



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Tesis

**Mejoras en el transporte intermodal:  
optimización en tiempo real del acarreo terrestre**

presentada por

Alejandro Escudero Santana

bajo la supervisión de

Dr. Jesús Muñuzuri Sanz

para la obtención del  
título de Doctor por la [Universidad de Sevilla](#)

en la  
[Escuela Técnica Superior de Ingeniería](#)  
[Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II](#)

5 de Noviembre de 2012



La tesis *Mejoras en el transporte intermodal: optimización en tiempo real del acarreo terrestre* presentada por el doctorando Alejandro Escudero Santana bajo la supervisión de Dr. Jesús Muñuzuri Sanz es requerimiento para la obtención del grado de Doctor por la [Universidad de Sevilla](#).

El Tribunal para su defensa fue nombrado por el Consejo del [Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II](#), el día \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2012.

Presidente: Dr. \_\_\_\_\_

Vocal: Dr. \_\_\_\_\_

Vocal: Dr. \_\_\_\_\_

Vocal: Dr. \_\_\_\_\_

Secretario: Dr. \_\_\_\_\_

CALIFICACIÓN:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Sevilla, a \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2012





*“La fototelegrafía permitirá enviar escritos,  
firmas o ilustraciones y firmar contratos  
a una distancia de 20.000 kilómetros.  
Todas las casas estarán conectadas.”*

*Julio Verne, “Paris en el Siglo XX”, 1863*

*“La paciencia es amarga, pero su fruto es dulce”*

*Jean-Jacques Rousseau*



## Agradecimientos

Agradecer la ayuda, directa o indirecta, recibida a lo largo de la realización de esta tesis no es un acto protocolario, sino lo mínimo que puedo hacer por todos aquellos sin los cuales este trabajo no habría sido posible.

En primer lugar, agradecer la orientación, el seguimiento y la supervisión recibida por el director de esta investigación, el Dr. Jesús Muñuzuri Sanz. Quisiera hacer extensiva mi gratitud a los compañeros del Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas II, en especial a los profesores Dr. Luis Onieva Giménez, Dr. Pablo Cortés Achedad, Dr. José Guadix Marín y Dr. Javier Navascués Fernández-Victorio, de los que tanto he aprendido. Y como no, a mis compañeros de despacho y también amigos, con los que he tenido la suerte de compartir tantas horas de conversación; Mari, Carlos y María siempre seréis los grandes culpables de que esta tesis haya podido terminarse.

También quisiera dar las gracias a la Dra. Raluca Raicu, de South Australia University, al profesor Dr. JHR van Duin, de Delft University of Technology, y al profesor Dr. Antonio Peregrín Rubio, de la Universidad de Huelva, por permitirme colaborar con sus departamentos y aprender de las investigaciones de otras instituciones.

Por último, agradecer a mis familiares y amigos la paciencia, el apoyo, y el ánimo recibido; especialmente a mis Padres y a Carmen, esta tesis os la debo a vosotros.



*A Carmen*





UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL Y GESTIÓN DE  
EMPRESAS II

ABSTRACT

**Mejoras en el transporte intermodal: optimización en tiempo real del  
acarreo terrestre**

Doctor por la Universidad de Sevilla

by Alejandro Escudero Santana

Road transport has always been prevalent in the movement of freight. However, the increasing road congestion and the necessity to find more sustainable means of transport have encouraged different governments to promote intermodality as an alternative. This combines the cost effectiveness of railways or ships with the flexibility of trucks. However, intermodal transport has several difficulties to overcome in order to become viable. One of them is a high fixed cost, which is why intermodality is unsuitable for trips shorter than a certain threshold distance.

In an intermodal transport chain, the initial and final trips, also called drayage operations, represent 40 % of total transport costs. The proper planning of drayage operations has the potential to reduce the threshold distance, thus it raises the viability of intermodal transport. The intermodal transport chain can become more efficient by means of a good organization of drayage movements; the main objective is normally the assignment of transportation tasks to the different vehicles, often with the presence of time windows. This scheduling has traditionally been done once a day and, under these conditions, any unexpected event could cause timetable delays. This thesis proposes to use the real-time knowledge about vehicle position to solve this problem, which permanently allows the planner to reassign tasks in case the problem conditions change. This exact knowledge of the position of the vehicles is possible due to the use of a geographic positioning system by satellite (GPS, Galileo, Glonass). The results show that these additional data can be used to dynamically improve the solution.



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL Y GESTIÓN DE  
EMPRESAS II

RESUMEN

**Mejoras en el transporte intermodal: optimización en tiempo real del  
acarreo terrestre**

Doctor por la [Universidad de Sevilla](#)

por Alejandro Escudero Santana

El transporte por carretera ha sido líder en el movimiento de mercancías. Sin embargo, el incremento de la congestión y la necesidad de buscar modos más sostenibles ha animado a las diferentes instituciones a promover la intermodalidad como alternativa; que combina la eficiencia del transporte ferroviario o marítimo con la flexibilidad del transporte por carretera. Sin embargo, el transporte intermodal presenta varias dificultades para llegar a ser viable. Uno de ellos es un alto coste fijo, que hace a la intermodalidad ineficiente en trayectos cortos, por debajo de una distancia umbral.

En la cadena intermodal, los trayectos iniciales y finales realizados por carretera son llamados acarreo terrestre, y representan el 40 % de los costes totales. La adecuada planificación del acarreo presenta un gran potencial para reducir los costes intermodales y reducir la distancia a partir de la cual la intermodalidad es rentable; el principal objetivo es la asignación de tareas de transporte a vehículos, a veces en presencia de restricciones temporales. Esta asignación ha sido tradicionalmente realizada una vez al comienzo del día, de modo que ante cualquier suceso inesperado podrían producirse retrasos. Esta tesis propone el uso de información en tiempo real relativa a la posición de los vehículos para una solución dinámica del problema, donde el planificador está siempre habilitado a rehacer la programación en el caso de que las condiciones cambien. Este conocimiento de la posición de los vehículos es posible gracias al uso de sistemas de posicionamiento por satélite. Los resultados demuestran que esta información permite mejorar la solución dinámicamente.



# Índice general

<b>Título</b>	<b>I</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XI</b>
<b>Resumen</b>	<b>XII</b>
<b>Índice general</b>	<b>XIII</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XVII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XXI</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>XXV</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes y motivación de la tesis . . . . .	2
1.2 Objetivos y alcance de la tesis . . . . .	3
1.3 Estructura de la tesis . . . . .	3
<b>I El transporte intermodal de mercancías</b>	<b>5</b>
<b>2 Antecedentes del transporte de mercancías</b>	<b>7</b>
2.1 El transporte de la Unión Europea en cifras . . . . .	7
2.2 Desequilibrado reparto modal . . . . .	10
2.3 Problemáticas actuales del transporte . . . . .	13
2.3.1 Congestión . . . . .	15
2.3.2 Seguridad . . . . .	15
2.3.3 Consumo energético y efectos medioambientales . . . . .	16
2.4 Políticas Europeas de Transporte . . . . .	17
2.5 Las Redes Transeuropeas de Transporte . . . . .	20
2.5.1 Las Redes de Transporte Nacional . . . . .	23
2.6 Planes y Programas del Transporte en Europa . . . . .	29
2.6.1 Planes nacionales . . . . .	30

2.7	Resultados de interés para el desarrollo de la tesis . . . . .	31
<b>3</b>	<b>La Intermodalidad como alternativa</b>	<b>33</b>
3.1	Definición de transporte Intermodal de mercancías . . . . .	34
3.2	La cadena logística del transporte intermodal . . . . .	37
3.2.1	Actores de la cadena intermodal . . . . .	37
3.2.2	Etapas de la cadena intermodal . . . . .	39
3.2.2.1	Recepción, verificación y confirmación del servicio de transporte . . . . .	40
3.2.2.2	Proceso de contratación e Incoterm . . . . .	40
3.2.2.3	El acarreo terrestre . . . . .	41
3.2.2.4	Transbordo en terminales y trayecto principal . . . . .	42
3.3	¿Es la intermodalidad la solución? . . . . .	45
3.4	Resultados de interés para el desarrollo de la tesis . . . . .	47
<b>4</b>	<b>El mercado actual del transporte intermodal y líneas para su mejora</b>	<b>49</b>
4.1	Las claves de la elección modal y su influencia sobre el mercado intermodal	50
4.2	Diferentes atributos del transporte intermodal . . . . .	52
4.2.1	Los costes . . . . .	52
4.2.1.1	Distancia de ruptura . . . . .	52
4.2.1.2	Factores que influyentes en los costes . . . . .	55
4.2.2	El tiempo de tránsito . . . . .	58
4.2.3	Flexibilidad y frecuencia de servicio . . . . .	59
4.2.4	Puntualidad . . . . .	59
4.2.5	Seguridad . . . . .	60
4.3	Modelo matemático de elección modal . . . . .	61
4.4	Modelo de ayuda a la decisión en el transporte intermodal . . . . .	63
4.4.1	Aplicación al transporte intermodal de España . . . . .	66
4.5	Posibles líneas de mejoras en el transporte intermodal . . . . .	67
4.5.1	Mejora globales de la cadena intermodal . . . . .	67
4.5.2	Mejora en cada etapa de la cadena intermodal . . . . .	69
4.6	Resultados de interés para el desarrollo de la tesis . . . . .	70
<b>II</b>	<b>Mejoras en el acarreo terrestre</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>El problema del acarreo terrestre</b>	<b>75</b>
5.1	Las operaciones de acarreo . . . . .	75
5.2	Revisión bibliográfica . . . . .	79
5.2.1	Enfoque estratégico-táctico . . . . .	80
5.2.2	Enfoque operativo . . . . .	81
5.3	Descripción del problema: <i>Daily Drayage Problem with Time Windows</i> . . . . .	84
5.3.1	Formulación del problema con tiempo de tránsito determinista . . . . .	85
5.3.2	Formulación del problema con tiempo de tránsito estocástico . . . . .	90
5.3.3	Consideraciones sobre tareas flexibles . . . . .	92
5.4	Resultados de interés para el desarrollo de la tesis . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Asignación dinámica a través del conocimiento en tiempo real de la</b>	

<b>posición de la flota</b>	<b>93</b>
6.1 Estructura global del sistema de planificación de tareas de acarreo . . . . .	94
6.2 Metodología dinámica de optimización . . . . .	95
6.3 Eventos de reoptimización . . . . .	99
6.4 Estado de las tareas y vehículos . . . . .	101
6.5 Pseudocódigo de la metodología dinámica . . . . .	103
6.6 Tecnologías existentes para el desarrollo de la metodología . . . . .	104
6.7 Resultados de interés para la tesis . . . . .	106
<b>7 Módulo de optimización de tareas de acarreo - heurísticas</b>	<b>107</b>
7.1 Heurística de ahorro en costes . . . . .	108
7.2 Heurística de vecino más cercano . . . . .	115
7.2.1 Variante serie . . . . .	116
7.2.2 Variante paralelo . . . . .	120
7.3 Heurística de inserción . . . . .	121
7.4 Heurística de inserción en dos fases . . . . .	130
7.4.1 Emparejamiento de tareas simples . . . . .	131
7.4.2 Construcción de rutas . . . . .	135
7.5 Heurística iterativa de inserción en dos fases . . . . .	139
7.6 Resultados de interés para la tesis . . . . .	145
<b>8 Módulo de optimización de tareas de acarreo - mecanismos de mejora</b>	<b>147</b>
8.1 Búsqueda local . . . . .	147
8.1.1 Operador de Cruce . . . . .	148
8.1.2 Operador de Combinación . . . . .	148
8.1.3 Operador de Inserción . . . . .	149
8.2 Algoritmo genético . . . . .	149
8.2.1 Bucle de optimización . . . . .	150
8.2.2 Codificación cromática . . . . .	151
8.2.3 Población inicial . . . . .	154
8.2.4 Evaluación y selección de los individuos . . . . .	154
8.2.4.1 Método de selección por torneo . . . . .	155
8.2.4.2 Método de selección proporcional a la función de evaluación	156
8.2.4.3 Selección proporcional al rango del individuo . . . . .	157
8.2.5 Operadores de cruce . . . . .	158
8.2.5.1 Operador de cruce basado en una correspondencia par-	
cial (PMX) . . . . .	158
8.2.5.2 El operador de cruce basado en ciclos (CX) . . . . .	159
8.2.5.3 Operador de cruce por orden (OX1) . . . . .	160
8.2.5.4 Operador de cruce basado en el orden (OX2) . . . . .	161
8.2.5.5 Operador de cruce basado en posición (POS) . . . . .	162
8.2.6 Operadores de mutación . . . . .	162
8.2.6.1 Operador de mutación basado en la mezcla (SM) . . . . .	163
8.2.6.2 Operador de mutación basado en la inserción (ISM) . . . . .	163
8.2.6.3 Operador de mutación basado en el intercambio (EM) . . . . .	164
8.2.6.4 Operador de mutación basado en desplazamientos (DM) . . . . .	164
8.2.7 Mecanismos de diversificación . . . . .	165

8.2.8	Procedimiento de parametrización del algoritmo genético . . . . .	165
8.2.8.1	Determinación de operadores de cruce y mutación . . . . .	166
8.2.8.2	Determinación de las probabilidades de cruce y mutación . . . . .	168
8.2.8.3	Determinación de los mecanismos de selección y de caída en óptimos locales . . . . .	171
8.3	Resultados de interés para la tesis . . . . .	176
<b>9</b>	<b>Resultados</b>	<b>177</b>
9.1	Comparativa de las heurísticas en entornos deterministas y sin reoptimi- zación . . . . .	177
9.2	Comparativa de las heurísticas en entornos estocásticos y sin reoptimización	188
9.3	Comparativa entre entornos deterministas y estocásticos . . . . .	198
9.4	Comparativa de las heurísticas en entornos estocásticos y con reoptimización	200
9.4.1	Comparación entre I2PH y I <sup>2</sup> 2PH . . . . .	200
9.4.2	Resultados ante reoptimizaciones al finalizar las tareas . . . . .	203
9.4.3	Comparativa ante diferentes eventos de reoptimización . . . . .	207
9.5	Inclusión de mecanismos de mejora sobre I <sup>2</sup> 2PH . . . . .	212
9.6	Resultados de interés para la tesis . . . . .	216
<b>10</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>217</b>
10.1	Resultados alcanzados . . . . .	219
10.2	Líneas futuras de investigación . . . . .	221
<b>III</b>	<b>Apéndices</b>	<b>223</b>
<b>A</b>	<b>Batería de Problemas y entorno de simulación</b>	<b>225</b>
A.1	Bateria de problemas . . . . .	225
A.1.1	La clase R . . . . .	226
A.1.2	La clase C . . . . .	227
A.1.3	La clase RC . . . . .	228
A.1.4	Ejemplo de instancia . . . . .	229
A.2	Entorno de simulación . . . . .	229
<b>B</b>	<b>Viabilidad de una solución propuesta</b>	<b>233</b>
B.1	Adaptación del lema de Solomon . . . . .	233
B.2	Método matricial de valoración de la viabilidad . . . . .	234
B.3	Ejemplo . . . . .	238
<b>C</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>241</b>
<b>IV</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>243</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>245</b>

# Índice de figuras

2.1	Crecimiento del tráfico de pasajeros y mercancías en la UE-27 . . . . .	8
2.2	Evolución del PIB en España . . . . .	9
2.3	Evolución del Empleo en el Sector del Transporte . . . . .	10
2.4	Reparto modal del transporte en la UE-27. . . . .	11
2.5	Evolución del transporte de mercancías por modo en UE-27. . . . .	11
2.6	Costes externos de diferentes modos de transporte (año 2000) . . . . .	14
2.7	Siniestralidad del transporte por carretera en la UE-27. . . . .	16
2.8	Proyectos prioritarios de la RTE-T. . . . .	22
2.9	Red de carreteras españolas . . . . .	26
2.10	Red ferroviaria de viajeros en España . . . . .	27
2.11	Red ferroviaria de mercancías en España . . . . .	27
2.12	Red de puertos del Estado . . . . .	28
2.13	Red aeroportuaria española. . . . .	28
2.14	Red de plataformas multimodales . . . . .	29
3.1	Esquema del transporte unimodal de mercancías . . . . .	34
3.2	Esquema del transporte Intermodal de mercancías . . . . .	36
4.1	Distancia de ruptura del TIM. . . . .	53
4.2	Posibles elecciones en el enfoque de Nierat. . . . .	54
4.3	Área de mercado del transporte intermodal . . . . .	54
4.4	Área de mercado del transporte intermodal . . . . .	55
4.5	Modelo red intermodal . . . . .	62
4.6	Modelo nodo desagregado . . . . .	63
4.7	Árbol de ayuda a la decisión para un cargador de la cadena intermodal . . . . .	64
4.8	Árbol de ayuda a la decisión para un transitario de la cadena intermodal . . . . .	65
4.9	Árbol de ayuda a la decisión para una empresa de transportes de la cadena intermodal . . . . .	65
4.10	Mapa del mercado intermodal en España. . . . .	66
5.1	Diferentes movimientos en las operaciones de drayage . . . . .	76
5.2	Cargas . . . . .	78
5.3	Ventanas temporales de las tareas . . . . .	87
6.1	Sistema global de optimización dinámica . . . . .	95

6.2	Esquema del seguimiento dinámico. . . . .	96
6.3	Ejemplos de reoptimización. . . . .	97
6.4	Reoptimización por desviación de la posición esperada . . . . .	100
6.5	Tareas ficticias. . . . .	102
6.6	Posibles situaciones de vehículos BUSY. . . . .	104
7.1	Ejemplo de inicialización de la heurística de ahorro en costes . . . . .	108
7.2	Ejemplo de solape entre rutas de la heurística de ahorro en costes . . . . .	109
7.3	Tiempo de espera entre dos tareas . . . . .	111
7.4	Heurística de máximo ahorro con tiempo de espera máximo. . . . .	113
7.5	Holgura entre tareas . . . . .	115
7.6	Variación de los costes totales respecto al coste máximo de ruptura de ventana permitido . . . . .	119
7.7	Desperdicios en la inserción . . . . .	126
7.8	Unión de tareas simples . . . . .	130
7.9	Viabilidad de unión de tareas atendiendo a las restricciones temporales . . . . .	132
7.10	Tiempo de espera mínimo en la unión de tareas . . . . .	133
7.11	Tiempo de inicio más temprano de un par $(i, j)$ . . . . .	134
7.12	Heurística I2PH con tiempo de espera máximo (Test R1.1) . . . . .	137
7.13	Tarea inalcanzable tras la reoptimización . . . . .	140
7.14	Heurística I <sup>2</sup> 2PH con tiempo de espera máximo (Test R1.1). . . . .	143
8.1	Representación Cromática A . . . . .	152
8.2	Representación Cromática B . . . . .	152
8.3	Representación Cromática cuando existen tareas finalizadas. . . . .	153
8.4	Evolución de la población a lo largo de las diferentes reoptimizaciones. . . . .	154
8.5	Selección por torneo . . . . .	156
8.6	Selección proporcional a la función de evaluación . . . . .	157
8.7	Selección proporcional al rango del individuo. . . . .	158
8.8	Ejemplos de padres . . . . .	158
8.9	Operador de cruce PMX. . . . .	159
8.10	Operador de cruce CX . . . . .	160
8.11	Operador de cruce OX1 . . . . .	161
8.12	Operador de cruce OX2 . . . . .	161
8.13	Operador de cruce POS . . . . .	162
8.14	Operador de mutación SM . . . . .	163
8.15	Operador de mutación ISM. . . . .	164
8.16	Operador de mutación EM. . . . .	164
8.17	Operador de mutación DM. . . . .	164
9.1	Análisis del intervalo de optimización para 25 clientes . . . . .	208
9.2	Análisis del intervalo de optimización para 25 clientes . . . . .	215
A.1	Distribución aleatoria de los clientes (R1-01). . . . .	227
A.2	Distribución clusterizada de los clientes (C1-01) . . . . .	228
A.3	Distribución semi-clusterizada de los clientes (RC1-01). . . . .	229
A.4	Cálculo del tiempo de tránsito . . . . .	231

B.1	Ejemplo del calculo matricial de la viabilidad . . . . .	238
-----	--	-----





# Índice de tablas

2.1	Ratio de crecimiento anual (%). UE-27 . . . . .	9
2.2	Longitud de las principales redes de transporte, EU-27. . . . .	12
2.3	Siniestralidad de diferentes modos de transporte (Año 2008) . . . . .	16
2.4	Redes Transeuropeas de Transporte . . . . .	21
3.1	Definiciones de transporte intermodal . . . . .	34
4.1	Factores influyentes en el coste del TIM. . . . .	57
5.1	Resumen de las operaciones de acarreo . . . . .	78
6.1	Ventanas temporales en vehículos del ejemplo . . . . .	97
6.2	Tiempos de ejecución de las tareas del ejemplo - sin retrasos . . . . .	98
6.3	Tiempos de ejecución de las tareas del ejemplo - con retrasos . . . . .	98
6.4	Tiempos de ejecución de las tareas del ejemplo - Reoptimización . . . . .	99
6.5	Casística de tareas ficticias . . . . .	103
7.1	Heurística de máximo ahorro con tiempo de espera máximo - 25 tareas . . . . .	113
7.2	Heurística de máximo ahorro con tiempo de espera máximo - 50 tareas . . . . .	114
7.3	Heurística de máximo ahorro con tiempo de espera máximo - 100 tareas . . . . .	114
7.4	Análisis de parámetros y adicción de vehículos en la heurística NN-Serie. . . . .	118
7.5	Análisis de parámetros en la heurística NN-Serie Tipo C . . . . .	119
7.6	Análisis parametros de NNH - Paralelo (Test R1.1) . . . . .	121
7.7	Análisis parámetros para IH - Caso A (Test R1.1). . . . .	127
7.8	Análisis parámetros para IH - Caso B (Test R1.1). . . . .	128
7.9	Análisis parámetros para IH - Caso C (Test R1.1). . . . .	129
7.10	Análisis del MAXWAITING en la heurística I2PH (Test R1.1 - 25 Tareas) . . . . .	138
7.11	Análisis del MAXWAITING en la heurística I2PH (Test R1.1 - 50 Tareas) . . . . .	138
7.12	Análisis del MAXWAITING en la heurística I2PH (Test R1.1 - 100 Tareas) . . . . .	139
7.13	Datos del ejemplo de la Figura 7.13 . . . . .	140
7.14	Análisis del MAXWAITING en la heurística I <sup>2</sup> 2PH (Test R1.1 - 25 Tareas) . . . . .	144
7.15	Análisis del MAXWAITING en la heurística I <sup>2</sup> 2PH (Test R1.1 - 50 Tareas) . . . . .	144
7.16	Análisis de MAXWAITING en la heurística I <sup>2</sup> 2PH (Test R1.1 - 100 Tareas) . . . . .	145
8.1	Determinación de los operadores de cruce y mutación . . . . .	167
8.2	Determinación de la probabilidad de cruce y mutación (I) . . . . .	168
8.3	Determinación de la probabilidad de cruce y mutación (II) . . . . .	168

8.4	Determinación de la probabilidad de cruce y mutación - 25 Tareas . . . .	169
8.5	Determinación de la probabilidad de cruce y mutación - 50 Tareas . . . .	170
8.6	Determinación de la probabilidad de cruce y mutación - 100 Tareas. . . .	170
8.7	Acrónimos de los tipos de selección y mecanismos de repoblación. . . .	171
8.8	Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (I) . . . .	172
8.9	Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (II) . . . .	172
8.10	Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (I) - 25 Tareas	173
8.11	Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (II) - 25 Tareas	173
8.12	Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (I) - 50 Tareas	174
8.13	Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (II)- 50 Tareas	174
8.14	Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (I) - 100 Tareas	175
8.15	Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (II) - 100 Ta- reas . . . . .	175
9.1	Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - R1 - 25 Tareas . . . .	178
9.2	Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - R1 - 50 Tareas . . . .	179
9.3	Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - R1 - 100 Tareas . . . .	180
9.4	Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - C1 - 25 Tareas . . . .	181
9.5	Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - C1 - 50 Tareas . . . .	182
9.6	Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - C1 - 100 Tareas . . . .	183
9.7	Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - RC1 - 25 Tareas. . . .	184
9.8	Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - RC1 - 50 Tareas. . . .	185
9.9	Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - RC1 - 100 Tareas . . . .	186
9.10	Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - Costes medios por tarea.	187
9.11	Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - R1 - 25 Tareas . . . .	189
9.12	Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - R1 - 50 Tareas . . . .	190
9.13	Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - R1 - 100 Tareas. . . .	191
9.14	Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - C1 - 25 Tareas . . . .	192
9.15	Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - C1 - 50 Tareas . . . .	193
9.16	Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - C1 - 100 Tareas. . . .	194
9.17	Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - RC1 - 25 Tareas . . . .	195
9.18	Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - RC1 - 50 Tareas . . . .	196
9.19	Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - RC1 - 100 Tareas . . . .	197
9.20	Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - Costes medios por tarea .	198
9.21	Comparativa entre entornos deterministas y estocásticos - empeoramiento en tanto por ciento . . . . .	199
9.22	Comparativa entre entornos deterministas y estocásticos - Incremento de costes medios por tarea . . . . .	200
9.23	Comparativa de heurísticas en entornos dinámicos - Costes Totales . . . .	201
9.24	Comparativa de heurísticas en entornos dinámicos - Mejoras . . . . .	202
9.25	Factor de mejora - Experimento 1 . . . . .	203
9.26	Factor de mejora - Experimento 2 . . . . .	203
9.27	Factor de mejora - Experimento 3 . . . . .	203
9.28	Heurísticas I <sup>2</sup> 2PH en entornos estocásticos y dinámicos - 25 Tareas . . . .	204
9.29	Heurísticas I <sup>2</sup> 2PH en entornos estocásticos y dinámicos - 50 Tareas . . . .	205
9.30	Heurísticas I <sup>2</sup> 2PH en entornos estocásticos y dinámicos - 100 Tareas . . . .	206
9.31	Análisis del intervalo de optimización (25 Tareas - Test R1.1) . . . . .	207

9.32	Comparación de eventos de reoptimización - Tiempo computacional . . .	208
9.33	Comparación de eventos de reoptimización - 25 Tareas . . . . .	209
9.34	Comparación de eventos de reoptimización - 50 Tareas . . . . .	210
9.35	Comparación de eventos de reoptimización - 100 Tareas . . . . .	211
9.36	Mecanismos de mejora sobre I <sup>2</sup> 2PH en entornos estáticos - 25 Tareas . . .	213
9.37	Mecanismos de mejora sobre I <sup>2</sup> 2PH en entornos dinámicos - 25 Tareas . .	214
9.38	El GA como método de adaptación en entornos dinámicos - 25 Tareas . .	215
A.1	Batería de problemas . . . . .	225
A.2	Clase R . . . . .	226
A.3	Clase C . . . . .	227
A.4	Clase RC . . . . .	228
A.5	Ejemplo de instancia - Clase R1 Test 1 . . . . .	230
B.1	Datos de las tareas del ejemplo . . . . .	238



# Lista de Algoritmos

1	Metodología dinámica . . . . .	105
2	Heurística dinámica de ahorro en costes . . . . .	112
3	Heurística dinámica de vecino más cercano - serie . . . . .	117
4	Heurística dinámica de vecino más cercano - serie . . . . .	120
5	Heurística de inserción . . . . .	125
6	Heurística de inserción en dos fases . . . . .	131
7	Heurística dinámica de inserción en dos fases - 1ª Fase . . . . .	135
8	Heurística dinámica de inserción en dos fases - 2ª Fase . . . . .	137
9	Heurística iterativa de inserción en dos fases . . . . .	141
10	Heurística iterativa de inserción en dos fases - Factor de mejora . . . . .	141
11	Heurística dinámica de inserción iterativa - Tareas prioritarias . . . . .	142
12	Heurística dinámica de inserción iterativa - Tareas prioritarias . . . . .	143
13	Algoritmo Genético . . . . .	151



# Acrónimos

ADIF	Administrador de infraestructuras ferroviarias
AENA	Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea
CE	Comisión Europea
CCI	Camara de Comercio Internacional
CLTI	Cadena Logística del Transporte Intermodal
DUA	Documento Único Administrativo
EASA	European Aviation Safety Agency
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ECMT	European Conference of Ministers of Transport
EMSA	European Maritime Safety Agency
ERA	European Railway Agency
ERSO	European Road Safety Observatory
ERTMS	European Rail Traffic Management System
FEDER	Fondo Europeo de Desarrollo Regional
FIATA	International Federation of Freight Forwarders Associations
GNSS	Global Navigation Satellite System
IATA	International Air Transport Association
I+D	Investigación y desarrollo
I+D+i	Investigación, desarrollo e innovación
INCOTERMS	International Commercial Terms
INE	Instituto Nacional de Estadística
ITS	Intelligent Transport Systems
PEIT	Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte
PETRA	Plan Estratégico para el Transporte por Carretera
PIB	Producto Interior Bruto
RENFE	Red Nacional de Ferrocarriles Españoles
RIS	River Information Services
RTE-T	Red Transeuropea de Transporte
SESAR	Single European Sky ATM Research

SSS	Short Sea Shipping
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
TIM	Transporte Intermodal de Mercancías
TMM	Transporte Multimodal de Mercancías
TMS	Traffic Management Systems
TOE	Tonne of oil equivalent
UC	Unidad de Carga
UE	Unión Europea
UE-17	Unión Europea de los 17
UE-27	Unión Europea de los 27
UIC	Internacional union of railways



# Introducción

Los europeos disfrutaban de un grado sin precedentes de movilidad personal, y las mercancías se envían rápida y eficazmente desde las fábricas a los clientes, a menudo en distintos países. La Unión Europea ha estimulado esta libertad abriendo los mercados nacionales y eliminando las barreras físicas y técnicas. Sin embargo, los modelos de transporte y las tasas de crecimiento actuales son insostenibles. Desplazar mercancías de manera rápida, eficaz y económica es un elemento central del objetivo de una economía dinámica y una sociedad con más cohesión en la UE, pero el constante crecimiento de la movilidad somete los sistemas de transporte a una gran presión. Uno de los principales condicionantes de un sistema de transporte saturado ha sido el desequilibrio entre los distintos modos de transporte, principalmente llevado a cabo por el transporte por carretera, que ha agravado los problemas existentes. El resultado es la congestión del tráfico, que converge en una menor eficacia económica, una mayor contaminación atmosférica y acústica, un aumento en el consumo de combustible, y un incremento en la accidentalidad.

En este sentido, el objetivo de la política común de transportes de la UE, reflejada en el Libro Blanco, es promover la movilidad sostenible, es decir, promover servicios de transporte eficiente, adecuados en costes, seguros, ambientalmente limpios y socialmente aceptados. Pero, ¿existen alternativas al transporte por carretera?, ¿Es posible reducir la congestión y las emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub>? A pesar de la existencia de modos de transporte menos contaminantes y más eficientes económicamente (transporte ferroviario y marítimo), el transporte por carretera presenta una flexibilidad y una capacidad *puerta a puerta* difícilmente alcanzable por otros modos. Por tanto, es necesario diseñar un sistema de transporte que, además de satisfacer las reclamaciones de sostenibilidad que la sociedad actual reclama, pueda también hacer frente a las exigencias de sus usuarios.

La Unión Europea ha señalado a la intermodalidad como principal modo para

solucionar los problemas existentes en la red transeuropea de transporte (RTE-T), pero ¿es realmente la intermodalidad la solución? Intermodalidad, en el sentido amplio de la palabra, implica el movimiento de mercancías haciendo uso de diferentes modos de transporte. De esta forma, es posible favorecerse de las benevolencias de cada modo, y hacer uso en cada tramo del transporte más adecuado para el mismo. Sin embargo, la transferencias y transbordos suponen un handicap que implica costes, tiempo, y pérdida de fiabilidad.

Definir bajo qué condiciones es la intermodalidad operativa actualmente, qué potencial podría tener la misma en los años venideros y proponer mejoras en todos los niveles del sistema de forma que mejorara su rendimiento y, por tanto, aumentara su nicho de mercado, es uno de los principales objetivos de la comunidad científica especializada.

## 1.1. Antecedentes y motivación de la tesis

El origen de esta tesis se encuentra dentro de las investigaciones desarrolladas y la información adquirida en el ámbito del proyecto INTERNODAL (Mejoras para la accesibilidad y eficiencia de los centros de intercambio modal y plataformas logísticas) con financiación del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Ministerio de Fomento (CEDEX) y del proyecto europeo GALILEO DRAYAGE, perteneciente al programa Era Star Regions del 6º Programa Marco de la Unión Europea.

El proyecto INTERNODAL tenía por objetivo la mejora de las condiciones de accesibilidad a los centros de intercambio modal y plataformas logísticas, públicas y privadas, con el fin de superar los cuellos de botella y falta de integración entre los agentes participantes, y así lograr un transporte intermodal puerta a puerta más fluido, rápido, flexible y sostenible. El proyecto partía del análisis de problemáticas actuales de la accesibilidad y capacidad de los centros intermodales, para posteriormente abordar la elaboración de unos criterios comunes que permitieran optimizar la accesibilidad.

Junto al proceso de transferencia de modo, la accesibilidad al nodo logístico supone uno de los puntos críticos de la cadena logística intermodal. Para que ésta sea eficiente debe facilitar el flujo de mercancías eliminando tiempos de espera y optimizando movimientos. Las líneas de acción del proyecto fueron: el establecimiento de la localización óptima y la dimensión de las terminales, los medios e infraestructuras tecnológicas necesarios, y el desarrollo de estándares de comunicación e integración de procesos y sistemas de información entre los agentes de la cadena.

Los resultados obtenidos de los estudios y simulaciones planteadas fueron aplicados en una experiencias piloto llevada a cabo en el Puerto Seco de Coslada, en la que participaron empresas públicas y privadas.

El proyecto GALILEO DRAYAGE centró sus investigaciones en la mejora del

acarreo terrestre, *drayage*, a través de un sistema centralizado de control que haría uso de información en tiempo real proveniente del sistema de navegación por satélite GALILEO. El proyecto comprendía tanto la definición de dicho sistema centralizado, como el desarrollo de los algoritmos necesarios que hicieran uso de tal información. Condición *sine qua non* para el correcto funcionamiento del sistema era la premisa de velocidad de ejecución que deberían cumplir los algoritmos que fueron desarrollados.

## 1.2. Objetivos y alcance de la tesis

El objetivo principal de esta tesis es contribuir a la mejora de la eficiencia en el transporte intermodal de mercancías a través del uso de las nuevas tecnologías. Para ello, se han desarrollados modelos y algoritmos que ayudan a una gestión automática de una flota de vehículos encargados de los movimientos de los contenedores en el *hinterland* de una terminal.

Este objetivo central se ha desagregado en una serie de objetivos subordinados que han permitido identificar las líneas de acción de la tesis:

- Caracterización y análisis de la situación del transporte intermodal en la Unión Europea y en España.
- Estudio de la literatura científica existente para el desarrollo del transporte intermodal, y especialmente en el caso del acarreo terrestre.
- Estudio de los factores determinantes para el éxito del transporte intermodal en España.
- Diseño de modelos de optimización para la mejora del acarreo terrestre
- Desarrollo de un entorno de simulación para los problemas del acarreo terrestre.
- Validación de los modelos propuestos en el entorno de simulación

## 1.3. Estructura de la tesis

Tras este primer capítulo introductorio, encargado de definir los conceptos esenciales, motivar el estudio que se presenta y definir los objetivos del mismo, se encuentra el Capítulo 2, que versa sobre la situación actual del transporte de mercancías y su tendencia de futuro. Dicho capítulo muestra cuantitativamente las problemáticas actuales del transporte de mercancías y expone las políticas y programas que desde la UE se están planteando para solucionarlas.

Seguidamente, aparece un bloque centrado en el transporte intermodal de mercancías y formado por tres capítulos. El Capítulo 3 define los conceptos de transporte intermodal, hace una breve introducción a la cadena logística que este tipo de transporte involucra y expone los motivos por los cuales la intermodalidad puede ser considerado una alternativa. Una vez definida la intermodalidad como alternativa, es interesante ver que motivos determinan la elección de un modo de transporte u otro por parte de los usuarios; esto se realiza dentro del Capítulo 4 que además desarrolla un modelo matemático de elección modal así como un sistema de ayuda a la decisión; de ese modo es posible determinar que nicho de mercado tiene la intermodalidad en España, con las condiciones actuales. Una vez visto el actual mercado que la intermodalidad tiene, se hace necesario proponer líneas de mejora que puedan aumentar el mismo y hacer a la intermodalidad más atractiva y competitiva.

La optimización del acarreo terrestre fue seleccionada como la línea de mejora del transporte intermodal a estudiar; esto se desarrolla en el siguiente bloque, el cual está formado por cinco capítulos. El Capítulo 5 plantea el problema del *daily drayage problem with time windows* realizando su formulación y haciendo un estudio del estado del arte. El Capítulo 6 es el eje central de la tesis, dado que plantea un sistema de asignación dinámica de las tareas de acarreo en tiempo real, método novedoso y no encontrado en las referencias estudiadas. Los Capítulos 7 y 8 plantean y estudian una serie de algoritmos que se encuentran incrustados dentro del sistema planteado en el capítulo anterior. El Capítulo 9 muestra los resultados de testear los algoritmos anteriormente propuestos en un entorno de simulación diseñado para tal fin.

Por último el se exponen las conclusiones alcanzadas en la tesis, se enumeran las aportaciones de la misma y futuras líneas de investigación. Además se enumeran las publicaciones que han salido de este trabajo y posibles publicaciones futuras que podrían realizarse.

El documento incluye también una serie de apéndices; el Apéndice A muestra el entorno de simulación creado y los test que se han realizado; el Apéndice B expone una metodología matricial para el calculo del coste de una ruta, dicha metodología es usada como parte de algunos algoritmos de los Capítulos 7 y 8; por último, el Apéndice C presenta un compendio de la nomenclatura matemática usada en la tesis.

Además de las conclusiones finales, cada uno de los capítulos de la tesis se cierra con una serie de conclusiones del capítulo que son de interés para el desarrollo de está investigación.

## Parte I

# El transporte intermodal de mercancías



# Capítulo 2

## Antecedentes del transporte de mercancías

El transporte es uno de los elementos fundamentales en las economías modernas. En el actual mundo globalizado, un transporte eficaz resulta necesario. En el presente capítulo se pretende dar una visión global de la situación en la que se encuentra el transporte de mercancías en Europa y en España.

En el primer epígrafe, se muestra la estrecha relación existente entre desarrollo económico y transporte. Se considerarán datos económicos relacionados con dicho sector, tanto en pasajeros como en mercancías, y la evolución que estos han experimentado en las últimas décadas. Además, se mostrarán datos que reflejan claramente el desequilibrado reparto modal que existe en la actualidad. En el epígrafe segundo, se hablará de las problemáticas asociadas al aumento de volumen de transporte, y al desequilibrio entre modos. En el tercer epígrafe se comentará la evolución de las políticas europeas de transporte, y los objetivos de futuro de las mismas. Por último, se mostrarán los planes y programas existentes en relación con este sector, reflejo fiel de las políticas actuales.

Una visión de conjunto de todo el capítulo permitirá comprender por qué el transporte es un elemento clave para el desarrollo regional, estatal y comunitario, motivo por el cual recibe tantas atenciones desde las distintas administraciones.

### 2.1. El transporte de la Unión Europea en cifras

El transporte es sin lugar a dudas uno de los sectores más importantes dentro de la Unión Europea (UE) y de los que mayor aumento han experimentado. Tomando datos de diferentes manuales publicados por la Comisión Europea ([European Commission, 2009, 2010a](#)) y de la oficina de estadística Eurostat ([European Commission, 2012](#)), en el

año 2010 la Unión Europea de los 27 (UE-27) superó la barrera de los 500 millones de habitantes, la mayoría de los cuales hacen uso del transporte en su vida diaria. Según datos del año 2008<sup>1</sup>, la media de desplazamiento por habitante y día fue 35,9 km, siendo 26,0 km de estos llevados a cabo en coche; en referencia al transporte de mercancías, por cada habitante una tonelada de bienes fue transportada diariamente una media de 22,5 km. Ese mismo año, el sector de los servicios de transporte generó 491.536 millones de euros, suponiendo el 13,4 % del consumo de los hogares comunitarios, y además empleo a más de 9,2 millones de personas.

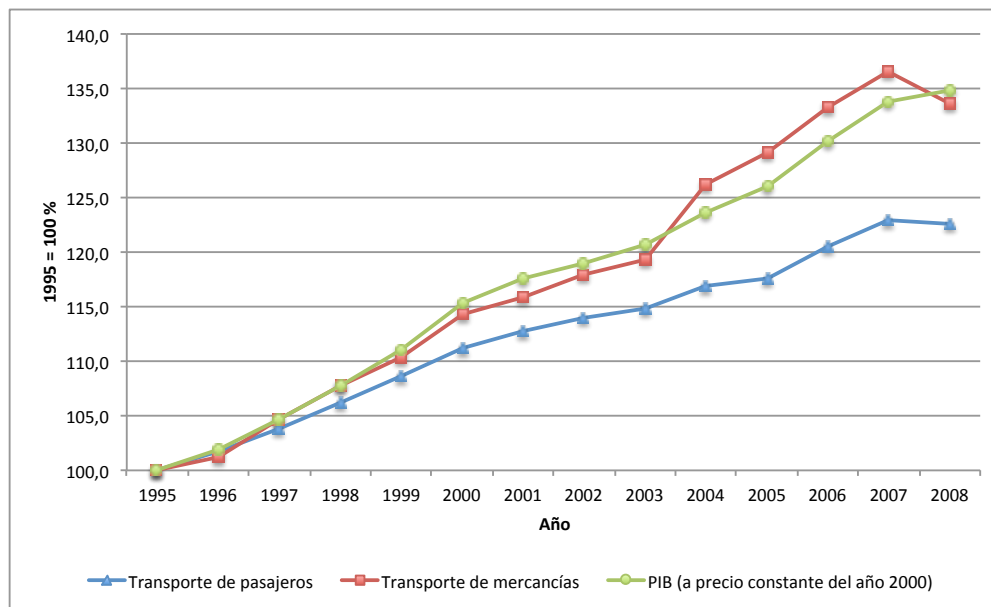


FIGURA 2.1: Crecimiento del tráfico de pasajeros y mercancías en la UE-27 comparado con el PIB

La tendencia de crecimiento del transporte ha sido tal, especialmente en el transporte de mercancías, que incluso ha superado al crecimiento del PIB en ciertos periodos (ver Figura 2.1). Mientras que en el periodo 1995-2007, el PIB tubo un incremento medio anual a una tasa de 2,5 %, el transporte de mercancías creció un 2,6 % de media (tomando toneladas·kilometros como indicador). Este significativo incremento de la demanda del transporte de mercancías durante dicho periodo fue debido a varios factores (Ponce y Prida, 2006); en primer lugar, los cambios en los procesos de producción industrial, con tendencias a producciones más ajustadas y a inventarios reducidos, como en el caso de la producción *Just in Time* y la filosofía *Lean Manufacturing*; en segundo lugar, los nuevos sistemas de distribución; y en último lugar, los hábitos de consumos de los clientes actuales. La tendencia al alza del crecimiento del transporte de mercancías ha sido truncada a partir del año 2007, motivado principalmente por la gran crisis económica acontecida. Un resumen del crecimiento del transporte comparado con el PIB en diferentes periodos, es mostrado en la Tabla 2.1.

<sup>1</sup>Últimos datos disponibles



TABLA 2.1: Ratio de crecimiento anual (%). UE-27

Intervalo	PIB	Transporte de mercancías	Transporte de pasajeros
1995-2007	2,5	2,6	1,7
2000-2007	2,2	2,6	1,4
2007-2008	0,7	-2,1	-0,3
1995-2008	2,3	2,3	1,6
2000-2008	2,0	2,0	1,2

Los datos mostrados con anterioridad son claro reflejo de la importancia de la movilidad y el transporte dentro de Europa. La UE señala a la movilidad como un derecho esencial de los ciudadanos, y al transporte de bienes como un componente de la competitividad de las industrias y los servicios europeos. Un transporte eficiente es esencial para el correcto desarrollo de la UE. Uno de los objetivos fundamentales de las políticas de transporte de la UE, según señala el Libro Blanco del transporte ([Commission of the European Communities, 2001](#)), es “mantener a Europa en movimiento”. El transporte se establece como un elemento crucial en el *Mercado Común*, cuyas políticas hacen posible el libre mercado de bienes y personas.

## El transporte de España en cifras

El transporte de España sigue pautas similares a la de otros Estados miembros, influido por la creciente integración de las economías europeas. Según datos del [Instituto Nacional de Estadística \(2012\)](#) y del anuario estadístico presentado por el [Ministerio de Fomento \(2010\)](#), el valor añadido que el transporte supuso para España en el año 2.007<sup>2</sup> fue de unos 43.296 millones de euros, más del 4,5 % de su PIB. Ese mismo año el sector ocupó a 1.177.100 personas, lo que supone alrededor del 5,7 % de la población ocupada.

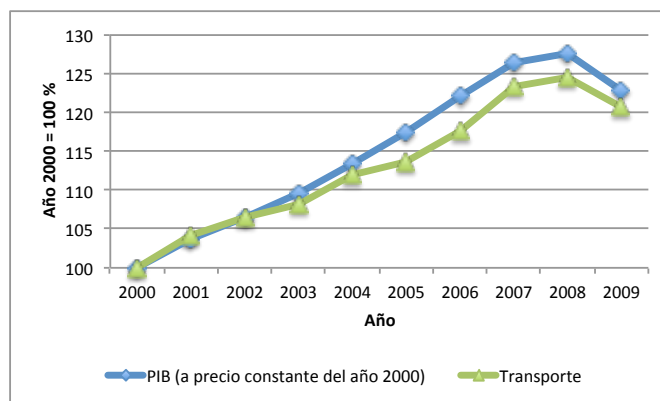


FIGURA 2.2: Evolución del PIB en España

<sup>2</sup>Últimos datos reales disponibles

Las Figuras 2.2<sup>3</sup> y 2.3 muestran la evolución de estos datos a lo largo de la última década, pudiendo observarse claramente como la crisis existente en los últimos años ha tenido efectos significativamente negativos tanto en los datos globales del estado como en el sector del transporte.

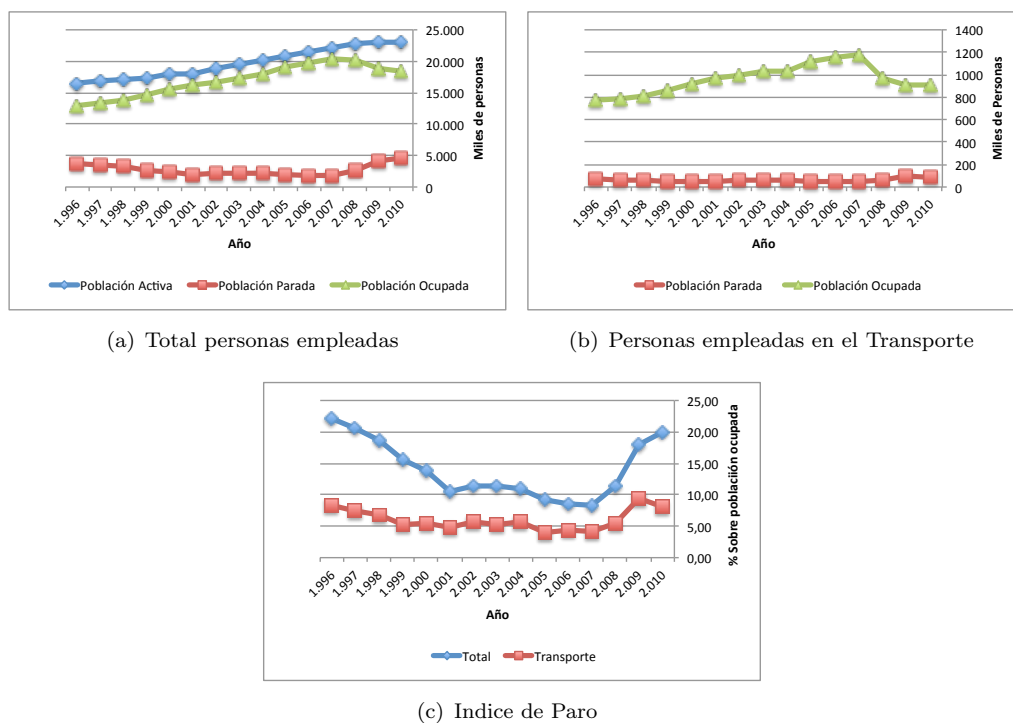


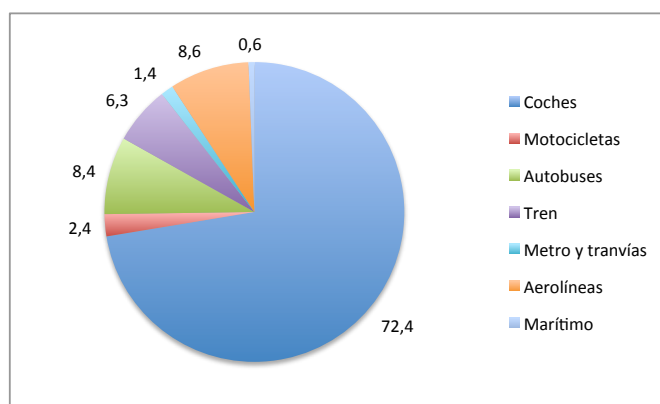
FIGURA 2.3: Evolución del Empleo en el Sector del Transporte

## 2.2. Desequilibrado reparto modal

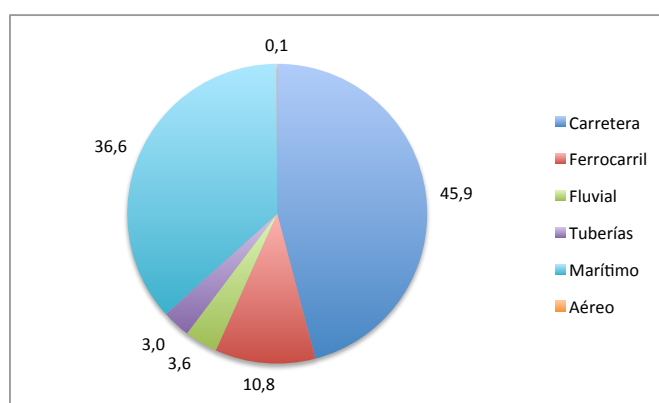
El crecimiento experimentado en Europa en el transporte no ha sido ecuánime entre todos los modos de transporte. Sin lugar a dudas, el transporte por carretera ha sido el que mayor crecimiento ha experimentado. Este aumento viene explicado principalmente por dos razones: en primer lugar, por el incremento de la motorización por parte de la población; en segundo lugar, por el crecimiento en el transporte de mercancías. En 2008, el transporte de pasajeros por carretera acaparaba el 72,4 % del total de los desplazamientos, mientras que en el transporte de mercancías su cuota de mercado alcanzaba el 45,9 %. En el caso de las mercancías, sólo el *Short Sea Shipping*<sup>4</sup> (SSS) ha alcanzado una porción de mercado interior parecida, situándose en el 36,6 % de los desplazamientos. En la Figura 2.4 se puede observar el reparto modal completo tanto del transporte de pasajeros como de mercancías.

<sup>3</sup>Los datos de 2008, 2009 y 2010 son provisionales

<sup>4</sup>Cabotaje o transporte marítimo intracomunitario



(a) Transporte de pasajeros



(b) Transporte de mercancías

FIGURA 2.4: Reparto modal del transporte en la UE-27, año 2008 (Fuente: Eurostat)

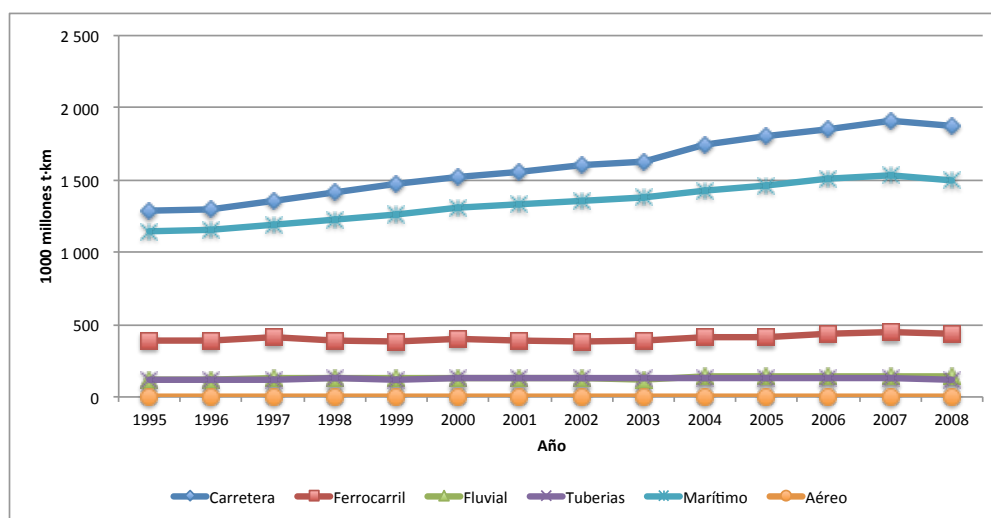


FIGURA 2.5: Evolución del transporte de mercancías por modo en UE-27 (Fuente: Eurostat)

Con objeto de clarificar aún más los desajustes modales, la Figura 2.5 muestra una evolución del crecimiento de los diferentes modos de transporte de mercancías intracomunitarios desde el año 1995. En la misma se puede observar que el transporte por carretera ha ido año a año aumentando el número de bienes transportados (medidos en toneladas·kilometro), solamente acompañado por el transporte marítimo intracomunitario. Sin embargo, el resto de posibles modos han permanecido estancados.

La Comisión Europea de Transporte y Energía destaca que, además de la mayor adaptación de algunos modos de transporte a las condiciones de mercado actuales, el desequilibrado crecimiento es debido a la exclusión, en muchos casos, de los costes externos en el precio del transporte, el alto incumplimiento de las normas sociales y de seguridad en el caso del transporte por carretera, y las propias políticas de transporte implantadas en la UE.

Atendiendo al último de los motivos planteados, las inversiones reales de transporte llevadas a cabo en los últimos años distan en muchas ocasiones de las políticas teóricas promulgadas. Es importante señalar que el destino final de buena parte de los Fondos de Cohesión y de los préstamos del Banco Europea de Inversiones, a instancias de los mismos Estados miembros, han favorecido más al transporte por carretera que a otros modos, como puede observarse en la Tabla 2.2. Todo esto hace entender con mayor facilidad la evolución de los diferentes modos de la Figura 2.5.

TABLA 2.2: Longitud de las principales redes de transporte, EU-27 (Fuente: Eurostat)

Año	Carretera <sup>a</sup>	Autopistas	Líneas Ferroviarias	Canales Navegables	Total
1990	4.051.756	41.885	234.602	39.952	4.397.867
2005	4.164.433	61.565	219.550	40.986	4.520.013
Incremento (%)	3	47	-6	3	3

<sup>a</sup>Excluyendo Autopistas

## Reparto modal en España

El caso de España no difiere de la situación Europea, de hecho se encuentra agudizado. Según datos proporcionados por el Ministerio de fomento para el año 2008, en el transporte internacional de mercancías con la UE los desplazamientos se realizan por transporte marítimo o carretera (53 % y 43 % respectivamente). El desarrollo del cabotaje compensa la carencia de posibilidades de transporte fluvial y el limitadísimo desarrollo del ferrocarril, que acapara un escaso 4,5 % de reparto modal frente a una media europea que ronda el 10 %. Mucho tiene que ver en esta cuestión la problemática que plantean los Pirineos y los distintos anchos de vías. En el caso del comercio internacional con terceros países el tráfico marítimo representa el 96 %.

En el transporte interior la carretera continúa siendo el único modo de transporte capaz de cubrir prácticamente cualquier tipo de demanda, por lo que no es de extrañar que represente el 85 % de las toneladas-kilómetro transportadas. El cabotaje, a pesar de su importancia, se encuentra muy especializado en ciertos tipos de cargas y de desplazamientos, como el transporte con la España no peninsular, y representa alrededor del 10 % de los desplazamientos.

Analizando los desplazamientos terrestres por separado, el transporte por carretera representa el 93 % de los desplazamientos, siendo el transporte ferroviario de sólo un 4 %.

### 2.3. Problemáticas actuales del transporte

Actualmente, el desequilibrado sistema de transporte de la UE ha traído ligada una serie de fenómenos negativos que pueden poner en juego su sostenibilidad. Entre todos estos fenómenos destacan el aumento de la congestión, la accidentalidad y el impacto ambiental.

Las causas de esta situación son diversas, y han sido comentadas del algún modo en los epígrafes anteriores. En primer lugar, el aumento experimentado en la demanda del transporte de la UE, el cual se ha producido de una forma desigual. En segundo lugar, el hecho de que los usuarios de los transportes no pagan todos los gastos que generan, ya que la estructura de precios no refleja los costes derivados de la infraestructura necesaria, de la posible congestión, de los efectos perjudiciales para el medio ambiente y de los accidentes. Por último, la cada vez más evidente deficiente organización del sistema de movilidad europeo y una utilización insuficiente de ciertos modos de transporte, así como de las nuevas tecnologías aplicadas al mismo.

Esto ha ocasionado que el transporte tenga ligado importantes costes externos<sup>5</sup>. La Figura 2.6 recoge cifras de un estudio sobre los costes externos del transporte en la UE-17 para diferentes modos de transporte (Schreyer et al., 2004). Estos costes externos (excluida la congestión que no aparece reflejada en la figura) supusieron más de 650 mil millones de euros en el año 2000, lo que representaba el 7,3 % del PIB total del conjunto de países de la UE en dicho año (UE-17). El cambio climático es el componente que mayor coste supone, con un 30 % del total, seguidos de la contaminación atmosférica y la accidentalidad que rondan el 25 %. El modo que más impacto provoca es la carretera, que origina el 83,7 % del coste total.

El Libro Blanco del Transporte (Commission of the European Communities, 2001), incluía un estudio de similares características pero relativo al año 1995. Una

---

<sup>5</sup>Coste generado por la actividad del transporte que no es abonado por el correspondiente usuario

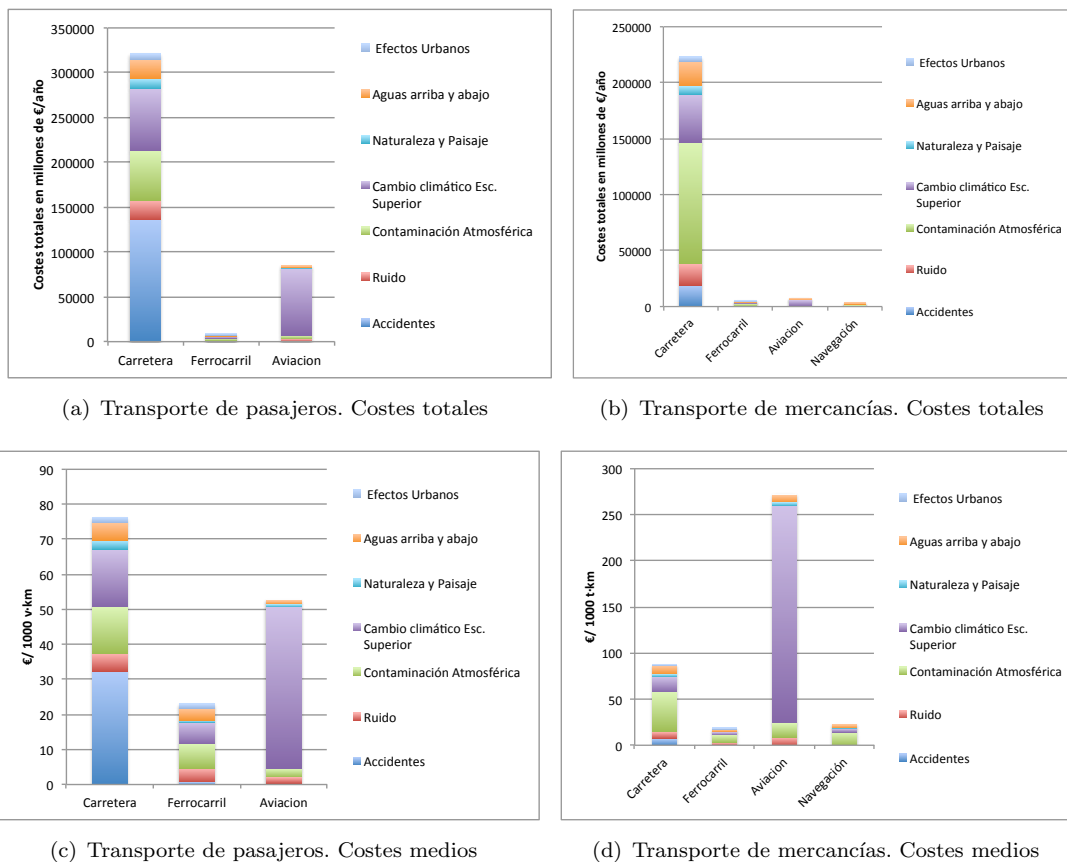


FIGURA 2.6: Costes externos de diferentes modos de transporte (año 2000)

comparativa entre ambos demuestran que los costes externos totales aumentaron un 12,1 % en dicho lustro.

Dar un valor monetario a los costes externos generados por el transporte no resulta sencillo y sus valores pueden resultar objeto de polémicas, dado que los datos que se muestren dependerán en gran medida de las consideraciones que se tengan en cuenta. A pesar de esto, los estudios desarrollados por [Schreyer et al. \(2004\)](#) y por la [European Conference of Ministers of Transport \(1998\)](#) obtienen datos bastante parecidos. El primero de los estudios mencionados concluye con un valor del coste externo del transporte por carretera para pasajeros de 32,4 euros/1000 via-km, siendo en el caso del transporte de mercancías por carretera de 7,6 euros/1000 T·km. El estudio realizado por la EMCT en el año 1998, cifra estos datos en 33 euros/1000 via-km y 21 euros/1000 T·km; lo cual se pueden considerar cifras muy similares.

Un manual realizado por CE Delft ([Maibach et al., 2008](#)) sobre costes externos en el transporte analiza diferentes metodologías para el cálculo de los diferentes conceptos de costes externos, del mismo modo que hace una revisión los proyectos de investigación realizados en dicho ámbito.

A continuación se explicarán con algo más de detalles los tres principales proble-

mas externos que viene ocasionando el transporte. En este punto es importante reseñar que estos problemas son ocasionados indistintamente por el transporte tanto de pasajeros como de mercancías, siendo en muchas ocasiones difícil desagregar la información.

### 2.3.1. Congestión

En los años 90 surgieron en Europa fenómenos de congestión en determinadas regiones y ejes concretos. Estos fenómenos de congestión siguen amenazando todavía hoy la competitividad económica de algunos Estados miembros de la UE y de la propia UE de cara a terceros países.

La mayor congestión se produce en las áreas urbanas. Ya es habitual observar iniciativas por parte de las administraciones locales que intentan paliar estos fenómenos, como ejemplo se encuentra las restricciones al acceso al centro de algunas ciudades, el fomento de los carriles bici... Sin embargo, ya es una realidad que la red transeuropea de transporte de carreteras sufre estos fenómenos. Ya en el año 2000 más del 10 % de la dicha red sufre problemas de congestión o son cuellos de botella, lo que suponen unos 7500 km.

El coste externo derivado de la congestión en el transporte por carretera representó aproximadamente el 0.5 % del PIB del año 2000 en la UE, con estimaciones de que pudiera alcanzar el 1 % del mismo ([Commission of the European Communities, 2001](#)). Como se ha mencionado con anterioridad, dar un valor monetario a la problemática de la congestión no resulta sencillo ([Schreyer et al., 2004](#)), este coste dependerá en gran medida de las consideraciones que se contemplen, tales como: la pérdida de la eficiencia, los ingresos necesarios para la internalización de dichos costes, o la estimación de los costes por retraso. A pesar de todo, sin profundizar en la cuantificación exacta de dichos estudios, es un hecho el perjuicio que tal fenómeno está teniendo sobre el transporte de mercancías, que a pesar de sólo suponer el 20 % del tráfico, sus costes de congestión se aproximan al total de los vehículos de viajeros.

### 2.3.2. Seguridad

Como refleja la Tabla [2.3](#) el transporte por carretera acapara la gran mayoría de los accidentes mortales en el transporte de la UE. Mientras que en el año 2008 murieron 38.875 personas en las carreteras de los 27 Estados miembros, sólo algo más de 300 personas perdieron la vida en otros modos de transporte.

La seguridad en el transporte por carretera es por tanto un tema de especial importancia. Sólo es necesario fijarse en las distintas campañas de la Dirección General de Tráfico para ser conscientes de las atenciones que recibe. El resto de modos de transporte, a pesar de su bajo índice de mortalidad, también recibe atenciones al respecto; es prueba

TABLA 2.3: Siniestralidad de diferentes modos de transporte (Año 2008)

Modo	Número de víctimas
Carretera	38.875
Ferrocarril	83
Aéreo	154
Marítimo	89

de ello la elaboración de listas negras de compañías según su accidentalidad, en el caso del transporte aéreo, o el gran número de estándares comunes de seguridad que han sido fomentados a través de diferentes agencias de seguridad, tales como: *European Road Safety Observatory (ERSO)*, *European Railway Agency (ERA)*, *European Maritime Safety Agency (EMSA)* y *European Aviation Safety Agency (EASA)*

Pese a las abrumadoras cifras comparativas, el mayor progreso en cuanto a seguridad se refiere se ha logrado en el transporte por carretera. La siniestralidad ha bajado un 31,1 % en las carreteras europeas en el periodo comprendido entre el año 2000 y el 2008, y un 48,8 % si es referido a datos del año 1990 (Ver Figura 2.7). Esto ha sido debido en gran parte al aumento de la seguridad en los coches, a una mayor conciencia por parte de la ciudadanía y a la mejora en las condiciones de las autopistas.

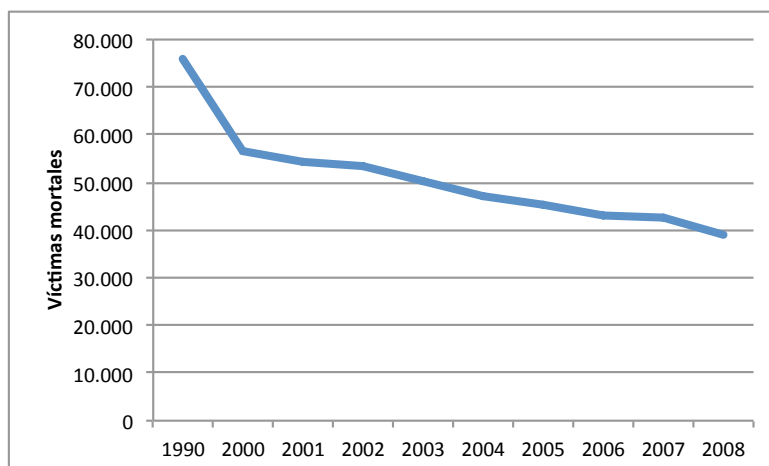


FIGURA 2.7: Siniestralidad del transporte por carretera en la UE-27

### 2.3.3. Consumo energético y efectos medioambientales

El consumo energético y los efectos medioambientales son las otras dos grandes problemáticas del sistema de transporte actual. De hecho, consumo energético y polución suelen ir muy ligados en el ámbito del transporte (Maibach et al., 2008). Es de sobra conocidos los efectos que dichas emisiones tienen sobre la salud humana y sobre el cambio climático.



Según datos mostrados por Eurostat en un manual sobre energía, transporte y medio ambiente ([European Commission, 2011](#)), el transporte consumió el 31,9 % de la energía de toda la UE-27, un total de 374.269 ktoe<sup>6</sup>. Sin embargo, el reparto de este consumo no es equitativo entre modos, siendo el transporte por carretera el que acapara el 81,5 % del consumo total. Del resto de modos sólo el transporte aéreo tiene un consumo representativo que corresponde a un 14,4 % del mismo.

El consumo energético del transporte ha aumentado desde los 330 millones de toe en el año 1998 hasta los 374 millones de toe del año 2008, lo que supone un incremento anual del 1,3 % aproximadamente. Sin embargo, esta tasa de crecimiento es considerablemente inferior a la tasa de crecimiento del mercado del transporte, que seguía una tendencia del 2,6 %. Este crecimiento no igualitario se debe en gran medida a dos factores: el desarrollo de un marco legal y a los avances tecnológicos.

En el caso de las emisiones de gases contaminantes, el número de millones de toneladas de equivalentes de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera ha pasado de 5.567 en el año 1990 a 4.940 en el año 2008; lo que ha supuesto una reducción del 11,2 %. Sin embargo, en el caso del transporte ha incrementado sus emisiones de las 778 toneladas a las 992 toneladas, siendo la única fuente que ha incrementado su valor en este periodo en lugar de reducirlo. Del total de emisiones el transporte por carretera ha acaparado el 93,1 %. A pesar de todo, la tasa de crecimiento de las emisiones provocadas por el transporte ha sido inferior que la del mercado del transporte en sí.

Existen otra serie de factores medioambientales, de las que no se ha hablado en profundidad pero que merecen la pena ser mencionadas: el ruido, que tiene efectos negativos sobre la salud humana y repercute en el precio del suelo; los efectos sobre el paisaje, con costes de reparación de daños; los efectos urbanos o las emisiones provenientes de la de producción y mantenimiento de infraestructuras y vehículos, o de la producción de energía para el transporte ferroviario.

## 2.4. Políticas Europeas de Transporte

La política de transportes es una de las principales preocupaciones de la Unión Europea. Desde la entrada en vigor del Tratado de Roma en 1958, esta política se ha centrado en el objetivo de eliminar los obstáculos en las fronteras entre los Estados miembros para contribuir a la libre circulación de las personas y de los bienes. En estos primeros andares de la Unión la política común de transportes estaba orientada en el transporte terrestre y marítimo. No sería hasta los años 70, cuando la política de transportes se amplió al transporte aéreo.

---

<sup>6</sup>Tonne of oil equivalent: se trata de una unidad de equivalencia estandarizada definida sobre la base de una tonelada de petróleo con un poder calorífico global de 41.868 KJ/Kg

En el año 1992, el Tratado de Maastricht recogió nuevos objetivos en la política de transportes que iban más allá de la simple política de movilidad. Entre los nuevos objetivos cabe destacar la preocupación por temas relacionados con la seguridad en el transporte y la protección del medio ambiente. Además, en dicho tratado apareció por primera vez el término de Red Transeuropea (ver epígrafe 2.5), el cual será vital en el posterior desarrollo de la UE. Siguiendo esta línea, el Libro Blanco “Crecimiento, competitividad, empleo - Retos y pistas para entrar en el siglo XXI” ([Commission of the European Communities, 1993](#)), hizo hincapié en la apertura del mercado del transporte y en la importancia de las redes transeuropeas.

En este contexto, la Comisión Europea adoptó el 12 de septiembre de 2001 un nuevo Libro Blanco, específico del Transporte, bajo el título “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad” ([Commission of the European Communities, 2001](#)), donde recoge las iniciativas y propuestas legislativas que preveía adoptar para desarrollar la política común de transportes durante el periodo 2000-2010. Los tres mensajes principales de dicho libro eran:

- La necesidad de un equilibrio de los diferentes modos de transporte para garantizar la movilidad de una Europa ampliada.
- La necesidad de luchar contra la congestión y los efectos medioambientales.
- La necesidad de orientar la política de transportes a los ciudadanos, que exigen más seguridad, más calidad y más protección en sus desplazamientos.

El objetivo de dicho Libro Blanco era establecer las medidas necesarias para orientar Europa hacia una movilidad sostenible, exponiendo los instrumentos políticos y legislativos para conseguirla. El documento se compone de un programa de acción con medidas escalonadas que tendrían que adoptarse antes del 2010 e incluye 60 medidas concretas con cuya aplicación se conseguiría separar el crecimiento de la movilidad y el crecimiento económico de los efectos perjudiciales de estos, sin tener que restringir la movilidad de las personas y de los bienes. Las medidas propuestas pueden agruparse en los siguientes temas:

1. Revitalización del ferrocarril.
2. Promoción del transporte marítimo (*Short Sea Shipping*) y de las vías navegables interiores, creando verdaderas autopistas del mar.
3. Hacer realidad la intermodalidad.
4. Mejorar la calidad del sector del transporte por carretera.
5. Mejorar la seguridad del transporte por carretera.

6. Revisión de la red transeuropea de transporte (*Transeuropean transport network*).
7. Equilibrar el crecimiento del transporte aéreo y preservación del medio ambiente.
8. Decidir una política de tarificación eficaz de los transportes.
9. Reconocimiento de los derechos y deberes de los usuarios.
10. Desarrollar un transporte urbano de calidad.
11. Poner la investigación y la tecnología al servicio de un transporte sostenible y eficaz.
12. Control de los efectos de la globalización del transporte.
13. Desarrollar los objetivos medioambientales a medio y largo plazo para un sistema de transporte sostenible.

En un comunicado de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo ([Commission of the European Communities, 2006a](#)), se realiza una revisión intermedia del Libro Blanco sobre la política de transportes y se redefinen los nuevos pilares para la política de transporte: la movilidad, la protección del medio ambiente, la innovación y la actuación a escala internacional. Este comunicado deja de manifiesto que las medidas contempladas por la comisión en el año 2001 habían logrado muchos avances, pero sin embargo, no habían bastado para alcanzar los objetivos iniciales, por lo que sería necesario un abanico más amplio y flexible de instrumentos de acción.

Debido a esto se publica un nuevo Libro Blanco sobre el transporte “Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible” ([Commission of the European Communities, 2011](#)) cuyos ideas van dirigidas a un Espacio Europeo Único de Transporte que facilite los movimientos de los ciudadanos y del transporte de mercancías, apoyándose en un desarrollo de las infraestructuras y de las nuevas tecnologías, a la vez se hace un especial llamamiento a la necesidad de la reducción de la dependencia del petróleo y la disminución de las emisiones de gases de efectos invernadero.

La política de transporte es un pilar fundamental en el fortalecimiento de la cohesión económica y social de la UE. Contribuye a reducir las disparidades regionales, mejorando el acceso a las regiones insulares y periféricas. El objetivo de la actual política de transportes es garantizar la movilidad de las personas y mercancías en el mercado europeo y con terceros países, así como aprovechar al máximo los dispositivos técnicos y de organización para facilitar el transporte de personas y de mercancías, respetando el medio ambiente. Estos objetivos tienen que conseguirse mediante la mejora de la seguridad, la reducción de ruidos y contaminación y la promoción de la protección del medio ambiente. Los temas prioritarios en la actual política de transportes son:

- Las redes transeuropeas.
- La Europa del ferrocarril.
- El transporte marítimo de la UE.
- El *Short Sea Shipping*.
- Transporte intermodal/combinado.
- Espacio único europeo.
- Movilidad sostenible.
- Seguridad en el transporte.
- Sistemas de transporte inteligente, principalmente el proyecto GALILEO.

## 2.5. Las Redes Transeuropeas de Transporte

Fue en el Tratado de Maastricht, 1992, donde se introduce por primera vez el concepto de *red transeuropea*. Estas han sido definidas en relación a las infraestructuras del transporte, de las telecomunicaciones y de la energía. En el caso particular de la red transeuropea de transporte (RTE-T), esta está compuesta por infraestructuras (carreteras, vías férreas y navegables, puertos, aeropuertos, medios de navegación, plataformas intermodales, canalizaciones de productos, etc. . . ) y por los servicios necesarios para el funcionamiento de esas infraestructuras. Un resumen de las diferentes redes de transporte es mostrado en la Tabla 2.4.

De acuerdo con la [Commission of the European Communities \(1993\)](#), las redes transeuropeas constituyen un elemento esencial para reforzar el mercado interior y el crecimiento económico, así como la cohesión económica y social de la UE. Es propósito de las RTE-T facilitar la movilidad entre los diferentes Estados, así como la interoperatividad de los diferentes modos de transporte, ofreciendo los servicios necesarios tanto para viajeros como para mercancías.

El Consejo Europeo de Essen, 1994, aprobó los proyectos prioritarios de las redes transeuropeas que podían recibir financiación comunitaria y que debían empezar antes del año 2010. La mayoría de catorce proyectos prioritarios que fueron definidos en el ámbito del transporte tenían relación con la integración de los distintos modos, con la interoperatividad y con la creación de una red europea de ferrocarriles de alta velocidad. Esto quedó reflejado en la Decisión n°1692/96/EC del parlamento y del Consejo Europeo, de 23 de julio de 1996, sobre las orientaciones comunitarias para el desarrollo de la red transeuropea de transporte.

TABLA 2.4: Redes Transeuropeas de Transporte

RTE	Descripción
Carretera	Compuesta por autopistas y carreteras de alta calidad.
Ferroviaria	Compuesta por la red de alta velocidad y por las líneas convencionales, así como por las infraestructuras necesarias para facilitar la interoperatividad del ferrocarril con otros modos.
Vías Navegables	Compuesta por ríos, canales, y por las conexiones existentes entre ellos, así como por los puertos y las infraestructuras portuarias. Los puertos constituyen la interconexión entre el transporte marítimo y los demás modos de transporte.
Aeroportuaria	Compuesta por los aeropuertos de interés común situados en el territorio comunitario y abiertos a la circulación aérea comercial.
Combinado	Formada por vías navegables y ferroviarias con eventuales rutas viarias iniciales o terminales. Incluye, además, instalaciones de transbordo entre las distintas redes.

El Libro Blanco para el transporte ([Commission of the European Communities, 2001](#)) propone la revisión de la Decisión n°1692/96/EC, debido principalmente a los retrasos experimentados en algunos proyectos de la “Lista de Essen”<sup>7</sup>, a la congestión de algunos ejes concretos de la RTE-T y sus consecuencias para la contaminación.

Fue en el año 2004 cuando en la Decisión n° 884/2004/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, se modifica la Decisión n°1692/96/EC. Esta decisión tiene en cuenta las recomendaciones que el Sr. Kare Van Miert, perteneciente al Grupo de Alto Nivel de la RTE-T, puso a disposición de la Comisión Europea en el año 2003. Se estableció una nueva lista de 30 ejes prioritarios (Ver Figura 2.8) que deberán iniciarse antes del año 2020, con un coste previsto total de 225.000 millones de euros, con el fin de acelerar la realización de los tramos fronterizos. Esta lista integra plenamente la dimensión de la nueva ampliación y su objetivo es establecer esquemas de movilidad más sostenibles, concentrando las inversiones en el transporte ferroviario y en las vías navegables.

Entre los 30 ejes prioritarios de la RTE-T se encuentran las *autopistas del mar*, gran asignatura pendiente de la política europea de transportes, las cuales constituyen itinerarios alternativos que deberían contribuir a la reducción de los cuellos de botella terrestres. Se invita a los Estados miembros a crear conjuntamente enlaces marítimos transnacionales mediante concurso ([Commission of the European Communities, 2006b](#)).

Parte del dinero destinado al desarrollo de estos ejes prioritarios, irá destinado

<sup>7</sup>Nombre con los que se conoce a los catorce proyectos prioritarios definidos en dicho consejo



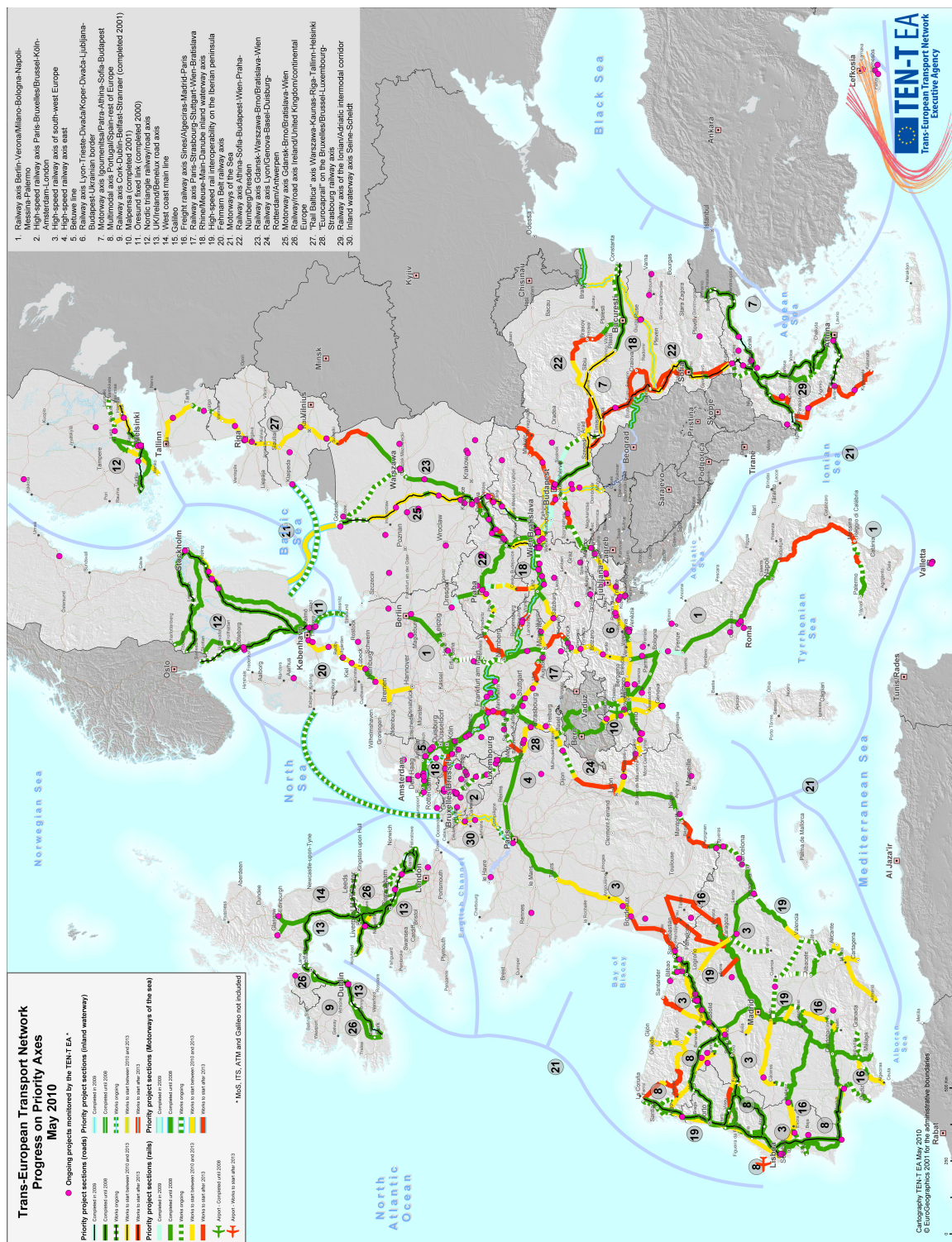


FIGURA 2.8: Proyectos prioritarios de la RTE-T

al desarrollo de *sistemas de gestión del tráfico* (*Traffic Management Systems, TMS*). Estos sistemas plantean el uso de las TICs en el sector del transporte; a través de los TMS el transporte puede hacerse más seguro, barato, limpio y fiable. Actualmente se están financiando proyectos relacionados con:

- *Intelligent Transport Systems* - (ITS)
- *GALILEO - European global navigation satellite system* (GNSS)
- *European Rail Traffic Management System* (ERTMS)
- *Single European Sky ATM Research* (SESAR)
- *River Information Services* (RIS)

En el año 2009, la Comisión Europea a través del Libro Verde “RTE-T: Revisión de la política - Hacia una red Transeuropea de transporte mejor integrada al servicio de la política común de transportes” ([Commission of the European Communities, 2009](#)) estableció un proceso general de revisión de las directrices de dicha política. Esta necesidad de revisión tenía como punto de partida la escasa relevancia con que esta política era percibida por los ciudadanos europeos. En el Libro Verde se resumen las reflexiones de la Comisión Europea e invita a aportar contribuciones, antes de presentar posibles propuestas legislativas y de otro tipo.

Para este proceso de revisión se constituyeron seis grupos de expertos, los cuales redactaron un informe ([European Commission, 2010c](#)). A esto se le añadió más de 300 respuestas que distintas entidades formularon sobre los planteamientos del Libro Verde ([European Commission, 2010b](#)), las cuales fueron presentadas en junio de 2010, durante las jornadas *TEN-T Days* celebradas en Zaragoza con motivo de la presidencia de turno española de la UE.

Basándose en [European Commission \(2010c\)](#) y [European Commission \(2010b\)](#) la Comisión Europea tomó la Decisión nº 661/2010/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 7 de julio de 2010, sobre las orientaciones de la Unión para el desarrollo de la red transeuropea de transporte. En la actualidad la RTE-T ya transporta la mitad de las mercancías y personas de la UE.

### 2.5.1. Las Redes de Transporte Nacional

Desde mediados de los años 80 hasta hace pocos años España realizó, ayudada por los fondos europeos, un esfuerzo considerable en superar las carencias que presentaba en infraestructuras de transporte. En dicha época se situó, junto con Alemania, en el primer puesto en la Unión Europea en cuanto al porcentaje del PIB dedicado a la inversión en infraestructuras de transporte. Desde el umbral del 0,5-0,6 % del PIB de

mediados de los ochenta se llegó a valores en torno al 1,7-1,8 % del PIB en los años previos a la crisis, con oscilaciones fuertemente vinculadas al ciclo económico. De esta manera las inversiones en infraestructuras de transporte en España duplicaban la media de la Unión Europea (entre el 1,0 y 0,85 % del PIB), hecho que ha permitido a España contar actualmente con una notable, aunque mejorable, red de transportes.

La actual red de carreteras españolas (Ver Figura 2.9) cuenta con un total de 165.787 km<sup>8</sup>; de los cuales 15.965 km pertenecen a vías de gran capacidad como autopistas, autovías y vías de doble calzada; 11.240 km pertenecen a la Red de Carreteras del Estado y 3.642 km a las Comunidades Autónomas. La red estructurante de carreteras del territorio peninsular está constituida por 25.733 km totales de la Red de Carreteras del Estado y por 3.642 km más pertenecientes a la red de autovías y autopistas de las Comunidades Autónomas.

Dicha red presenta varias características que es interesante destacar: el carácter acusadamente radial, aunque se ha iniciado el mallado de la red; en déficit de accesibilidad a algunas partes del territorio, que es necesario corregir; y la obsolescencia e inadecuación a parámetros de seguridad de partes significativas de la red.

La red ferroviaria de interés del Estado en servicio (Ver Figuras 2.10 y 2.11) tiene una longitud de 15.214 kilómetros (13.945 gestionados por ADIF), de los que más de 2.099 kilómetros corresponden a líneas de alta velocidad de ancho internacional UIC. España es el segundo país del mundo en cuanto a kilómetros de alta velocidad, con 2.849 kilómetros<sup>9</sup> en servicio; y es el líder europeo en líneas equipadas con el sistema automático de protección ERTMS, operando en 1.712 kilómetros. La red doble electrificada se encuentra extendida por más de 5.000 kilómetros, mientras que son más de 6.000 kilómetros los servicios prestados sobre una red única y sin electrificar.

Algunos de los elementos más relevantes de la situación actual de la red son: las notables diferencias de niveles de dotación, en términos de calidad y seguridad, entre las líneas de la red; la existencia de tramos y líneas con tráfico débil; las dificultades de integración de la red en el marco internacional, siendo la diferencia de ancho de vía uno de los principales motivos, aunque no el único; y el importante desarrollo experimentado por las redes y servicios de cercanías en las grandes áreas urbanas.

El sistema portuario español (Ver Figura 2.12) de titularidad estatal está integrado por 46 puertos de interés general, gestionados por 28 Autoridades Portuarias, cuya coordinación y control de eficiencia corresponde al Organismo Público Puertos del Estado. El sistema portuario de España, que es el país de la UE con mayor longitud de costa (8.000 km), constituye la principal vía de entrada y salida de las mercancías que nuestro país importa o exporta, por ellos pasan el cerca del 60 % de las exportaciones

---

<sup>8</sup>Datos del año 2010

<sup>9</sup>Incluye líneas de la red convencional que cumplen las condiciones del apartado 4 del artículo 3 del Reglamento del Sector Ferroviario.



y el 85 % de las importaciones, lo que representa el 53 % del comercio exterior español con la Unión Europea y el 96 % con terceros países.

Es importante señalar que más que la capacidad de las infraestructuras marítimas, los principales condicionantes para el desarrollo de la actividad portuaria son: la necesidad de adaptar sus instalaciones y servicios a las circunstancias cambiantes de la demanda; y la dotación de accesos terrestres por carretera y ferrocarril, que permitan la interconexión de las diferentes redes.

Los aeropuertos de interés general (Ver Figura 2.13), gestionados por Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea (AENA), son 47, siendo 6 más los aeropuertos de gestión privada; sin embargo, la actividad se concentra en un corto número de aeropuertos.

Aunque la red de transportes españolas es bastante extensa, presenta sus carencias, y prueba de ello es que cuatro de los 30 ejes prioritarios de la RTE-T está íntimamente relacionados con España (sin considerar las *autopistas del mar*, relacionadas con todos los países costeros):

- **Eje ferroviario de alta velocidad del sureste de Europa:** El proyecto comprende la construcción de una línea que una Madrid con Dax vía Vitoria donde conectará con la red ferroviaria francesa. El ramal mediterráneo discurre entre Madrid, vía Zaragoza y Barcelona, hasta Perpignan con una posible extensión hasta Nimes donde conectaría con la red mediterránea francesa de alta velocidad. Con estos proyectos España quedaría conectada la red ferroviaria europea a través de la línea ferroviaria francesa.
- **Eje ferroviario de mercancías Sines-Madrid-París:** comprende la creación de una línea ferroviaria de alta capacidad a través de los Pirineos que conectará las redes española y francesa. Esta nueva línea estará destinada al transporte de mercancías e incluirá la construcción de un túnel de larga distancia. En la actualidad están en estudio distintos proyectos con origen en Zaragoza.
- **Eje multimodal Portugal/España con el resto de Europa:** persigue el refuerzo de tres importantes corredores multimodales que conectarán España con Portugal, además de conectar a ambos con el resto de Europa e incluye la mejora de las rutas a través de la frontera hispano-portuguesa, uniendo ciudades como Sevilla o Vigo con los principales puertos, aeropuertos y centros urbanos de Portugal.
- **Interoperatividad de la red ferroviaria de alta velocidad de la península ibérica.**

Actualmente, debido a la crisis económica que sufre España, el ritmo de inversión y de desarrollo de infraestructuras de transporte es mucho menor que el experi-

mentado en las últimas décadas. En muchos ocasiones han llegado a pararse o aplazarse temporalmente proyectos que iban a comenzar o estaban en desarrollo. Por ese motivo es fundamental las conexiones que la UE considere parte de la red básica de la RTE-T, dado que serán cofinanciadas por las arcas comunitarias. España llevó a Bruselas en el año 2011 cinco ejes ferroviarios para el transporte de mercancías, siendo los cinco declarados de interés por la Unión Europea aunque la comisión declaró prioritarios el corredor mediterráneo y el eje atlántico.

El corredor mediterráneo se convertirá en la puerta de las mercancías asiáticas para toda la Unión Europea; estas llegan al Mediterráneo por el canal de Suez pero hasta ahora, debido a las malas comunicaciones de los puertos españoles, en su mayoría seguían su camino por el estrecho de Gibraltar y se iban hacia los puertos del norte de Europa. El atlántico será la salida de Portugal a Francia.

El 15 de Febrero de 2012, la ministra de Fomento presentó una nueva propuesta de desarrollo de la RTE-T en España siendo la misma la presentada en las Figuras 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 y 2.14.



FIGURA 2.9: Red de carreteras españolas (Actual y propuesta)

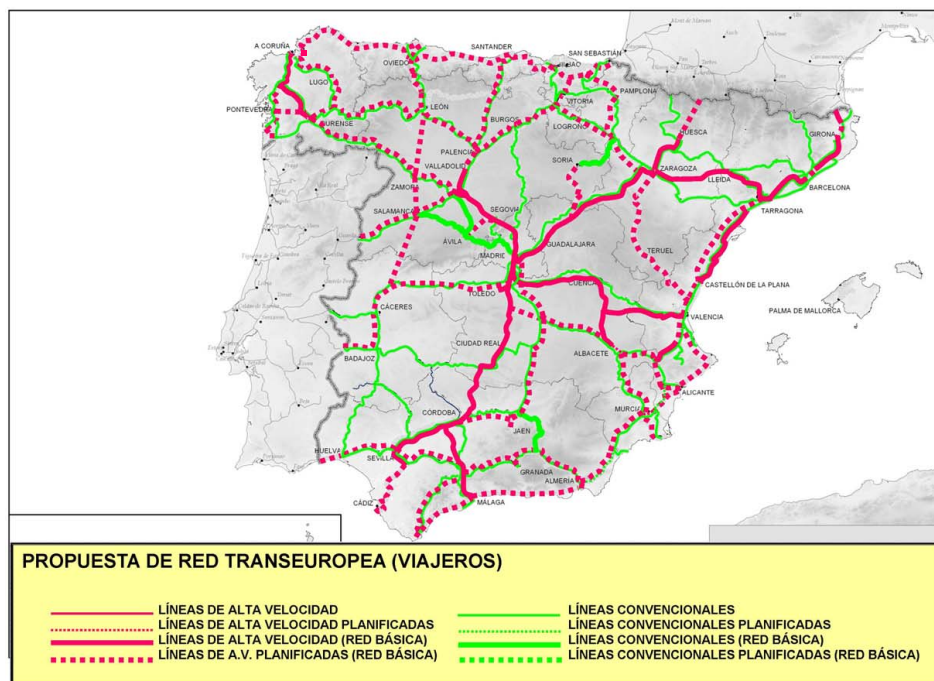


FIGURA 2.10: Red ferroviaria de viajeros en España (actual y propuesta)

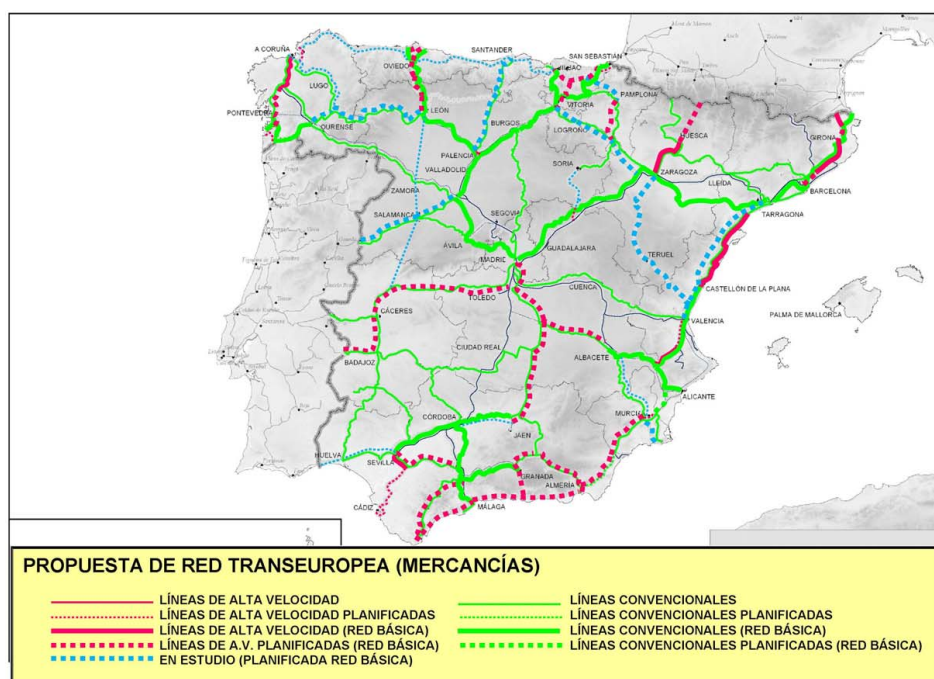


FIGURA 2.11: Red ferroviaria de mercancías en España (actual y propuesta)

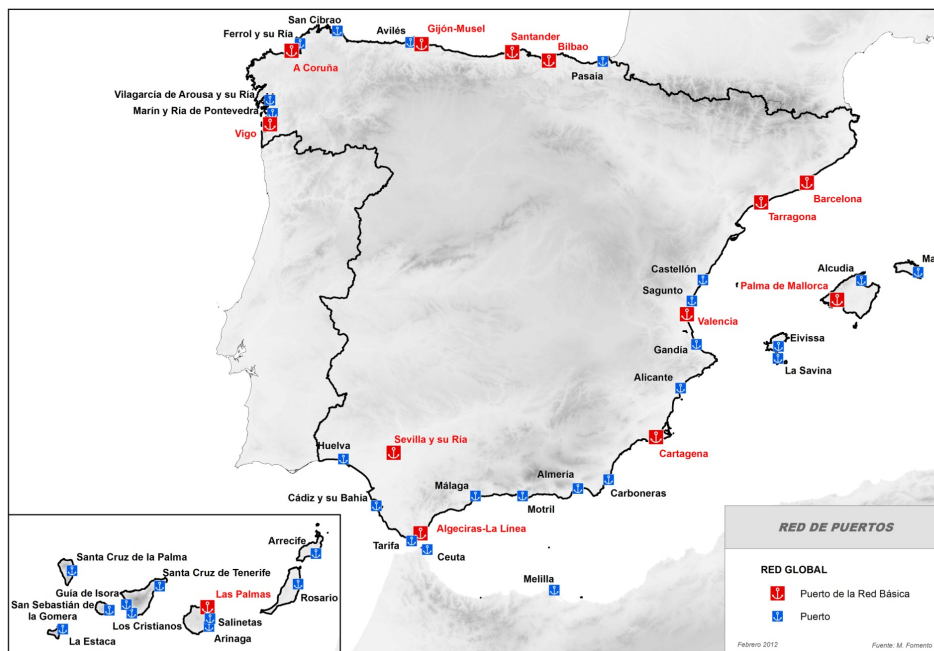


FIGURA 2.12: Red de puertos del Estado

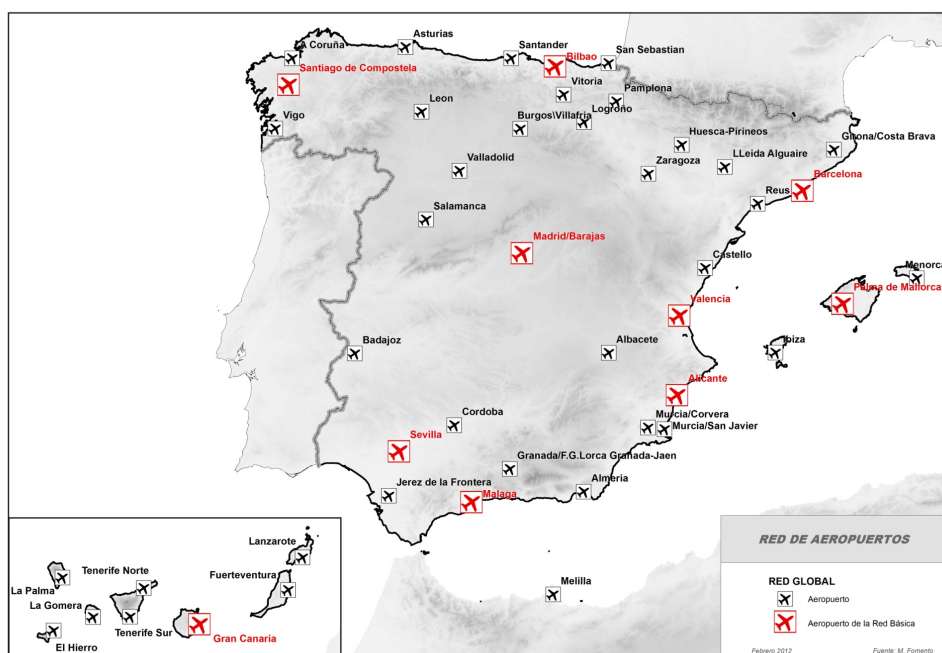


FIGURA 2.13: Red aeroportuaria española

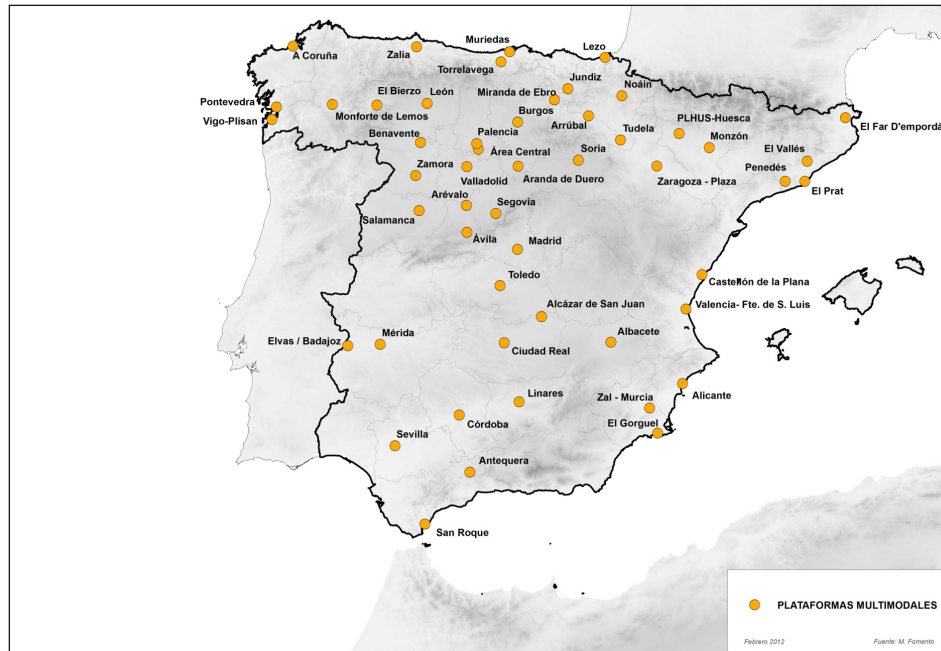


FIGURA 2.14: Red de plataformas multimodales

## 2.6. Planes y Programas del Transporte en Europa

Como se ha podido comprobar con anterioridad, el transporte de mercancías es un pilar fundamental de las distintas políticas europeas, nacionales y autonómicas; todo el conjunto de las administraciones coincide en la necesidad de un cambio de rumbo hacia transportes más sostenibles. Toda esta preocupación por el medio ambiente, la congestión y la seguridad se está traduciendo en una enorme cantidad de inversiones que se están realizando tanto en infraestructuras de transporte como en I+D+i, aunque en los últimos años haya existido un parón importante. La UE cuenta con una serie de programas de financiación para la consecución de los objetivos marcados por la política europea de transportes.

El programa Marco Polo (que ya va por su segunda fase: Marco Polo II) es consecuencia de la necesidad de conseguir acabar con la congestión que actualmente caracteriza alguno de los modos y ejes de transporte de la RTE-T. En este sentido, la finalidad de este programa es el fomento decidido de los proyectos de transferencia entre modos, a todos los niveles de mercado del transporte de mercancías. De la misma manera, Marco Polo estará en disposición de financiar y apoyar todos aquellos proyectos que apuesten por la intermodalidad incluso en el marco geográfico de los Estados Candidatos a la integración.

Marco Polo va dirigido a la promoción de servicios comerciales en el ámbito del mercado de transporte de mercancías. Lo que centrará la principal atención en el programa no son las investigaciones y el desarrollo, ni siquiera las medidas en materia

de infraestructuras, sino el fomento decidido de un paquete de servicios comerciales de cara al mercado del transporte.

Otro programa comunitario es el programa Marco, dirigido a la I+D, que en la actualidad se encuentra en su séptima edición. Uno de los principales objetivos del Séptimo Programa Marco es conseguir que Europa se convierta en el primer polo científico y tecnológico del mundo. Es con este fin con el que el Programa Específico de Cooperación viene a apoyar la cooperación entre universidades, industrias, centros de investigación y poderes públicos tanto dentro de la Unión Europea (UE) como con el resto del mundo.

El Programa Específico presenta nueve temas que corresponden a los grandes campos del conocimiento y de la tecnología donde es preciso impulsar la cooperación transnacional para poder hacer frente a los retos actuales en los ámbitos social, económico, medioambiental o industrial. Uno de estos temas se corresponde con el transporte. En materia de transportes, el objetivo primordial es crear estructuras que sean no sólo más competitivas, sino también más seguras y más ecológicas.

Con el enfoque que da a este tema el Programa, la prioridad será elaborar y aplicar nuevas políticas que pongan los avances tecnológicos al servicio de unos transportes europeos sostenibles. Para ello, el sistema europeo de navegación mundial por satélite, que engloba a Galileo y EGNOS, ofrece numerosas posibilidades que deberán aprovecharse.

Otra de las iniciativas comunitarias favorecedoras del transporte es el programa Interreg, actualmente Interreg IV, relativa a la cooperación transeuropea destinada a favorecer un desarrollo armonioso y equilibrado del territorio europeo. Este Programa se ha estructurado en cinco ejes prioritarios, siendo uno de ellos el *Desarrollo de los transportes y comunicaciones, sociedad de la información e I+D*.

El Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), destinado a reducir las diferencias existentes entre los niveles de desarrollo de las regiones europeas, considera al transporte como un ámbito de aplicación de sus objetivos de *Convergencia*.

### 2.6.1. Planes nacionales

A nivel Estatal dos son los planes que tienen grandes orientaciones a la mejora de la intermodalidad en el transporte de mercancías: PEIT y PETRA.

El *Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte* (PEIT), aprobado por Acuerdo del Consejo de Ministros de 15 de julio de 2005, constituye un conjunto de medidas y actuaciones orientadas a lograr un sistema de transportes más integrado, seguro, eficiente y respetuoso con el entorno. El Plan define las directrices básicas de la actuación en infraestructuras y transporte de competencia estatal con un horizonte a medio y largo plazo (2005-2020). El Plan está inspirado en la preocupación por el desarrollo



sostenible, y por una gran sensibilidad de carácter medioambiental. Los modos más potenciados por el PEIT son precisamente los que más contribuyen a la sostenibilidad del transporte, ejemplo el transporte ferroviario.

Las actuaciones ferroviarias concentran más del 48 % de las inversiones totales del plan. La potenciación del ferrocarril se inscribe en el marco de la implantación de un sistema intermodal integrado de transporte, tanto de mercancías como de viajeros, en el que los restantes modos también desempeñan un papel fundamental. Por ello, las inversiones en los modos de transporte por carretera, marítimo y aéreo se mantienen en los niveles apropiados para dar satisfacción, en condiciones de calidad y seguridad, a los aumentos esperados de demanda, muy importantes en algunos casos, y para contribuir proporcionadamente al cumplimiento de los objetivos globales del Plan.

El desarrollo idóneo del transporte intermodal de mercancías necesita no sólo de unas infraestructuras suficientes en cada uno de los modos concurrentes, sino que además impone unas exigencias propias a las infraestructuras y requiere de plataformas específicas donde se realice el intercambio modal. Asimismo, requiere unos servicios específicos de operadores de la red intermodal y de manipulación de estas cargas. Este Plan Intermodal del Transporte de Mercancías se encuentra integrado dentro del PEIT, y contempla simultáneamente:

- Las actuaciones infraestructurales: nodos y corredores.
- El marco de prestación de los servicios

El otro gran plan nacional, el *Plan Estratégico para el Transporte de Mercancías por carretera* (PETRA) contempla un amplio abanico de medidas cuyo objetivo final es la modernización y la consecución de una mayor eficiencia de las empresas de transporte por carretera.

Entre las principales líneas de actuación que contempla PETRA se encuentran: infraestructuras e intermodalidad. El desarrollo de redes de transporte que respondan a las necesidades de movilidad de mercancías de una manera integral, facilitando la interconexión entre cada uno de los modos de transporte, es uno de los elementos clave en el desarrollo del sector.

## 2.7. Resultados de interés para el desarrollo de la tesis

En este capítulo se ha presentado una visión general de la evolución del transporte en Europa y se han identificado los problemas actuales a los que se enfrenta el mismo debido al rápido crecimiento que ha experimentado.

Las problemáticas expuestas suponen un reto para el conjunto de las instituciones europeas, tanto públicas como privadas, por lo que se han enumerado las políticas que vienen desarrollándose en materia de transporte, así como los planes y programas que sustentan a las mismas económicamente.

El transporte necesita un cambio de rumbo, comprender cuáles son los problemas reales a los que se enfrenta y qué líneas de acción se están financiando es vital para poder dirigir los esfuerzos de una manera eficiente.



# Capítulo 3

## La Intermodalidad como alternativa

En el capítulo anteriores, se ha analizado los antecedentes y la situación del transporte en la Unión Europea y en España; mostrándose lo vital que es el sector en el día a día de todos los ciudadanos. Sin embargo, los datos reflejan que su situación es insostenible, ya que presenta unos elevados índices de costes externos.

En el caso particular del transporte de mercancías, las consecuencias más evidentes son los ruidos, la polución, el elevado consumo de combustible, la accidentalidad y la congestión de las carreteras; debido principalmente al reparto desigual entre los distintos modos de transporte.

Desde la UE se buscan alternativas, transportes más sostenibles que pudieran ayudar a paliar los efectos perjudiciales que el transporte por carretera conlleva. La pregunta a plantearse sería: ¿existen alternativas al transporte por carretera?, ¿es posible reducir la congestión y las emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub>? Ya desde el Libro Blanco de la Unión Europea sobre política de transporte ([Commission of the European Communities, 2001](#)) se señaló a la intermodalidad como alternativa al transporte por carretera y solución a los problemas que este trae ligados. Sus posteriores revisiones y las políticas particulares de los distintos estados miembros han seguido señalando a la intermodalidad como el elemento necesario para un cambio de paradigma en el transporte.

En el presente capítulo se definirá el concepto de transporte intermodal, explicándose las diferentes formas y posibles variantes de llevarlo a cabo. Además, se enumerarán los diferentes actores que aparecen en la cadena logística intermodal, resumiéndose las diferentes partes de la misma y el flujo de información necesario. Por último se enumerarán los motivos por los que se señala a la intermodalidad como la alternativa al transporte unimodal.

### 3.1. Definición de transporte Intermodal de mercancías

El transporte de mercancías aparece por la necesidad de mover bienes desde un punto de origen, donde se recoge la mercancía, hasta otro punto designado para la entrega de la misma, al cual se llamará destino. Cuando el transporte es llevado a cabo por un solo modo de transporte se habla de transporte unimodal. Se entenderá como modo de transporte al conjunto de técnicas de transporte que utilizan vías de transporte de la misma naturaleza<sup>1</sup>, por tanto, en la actualidad se pueden considerar los siguientes modos: navegación marítima y fluvial, transporte aéreo, carretera y ferrocarril, además de las tuberías. La Figura 3.1 muestra un ejemplo de transporte unimodal llevado a cabo por un camión entre los puntos A y B.



FIGURA 3.1: Esquema del transporte unimodal de mercancías

Cuando el transporte es llevado a cabo por varios modos de transporte a lo largo de su recorrido se comenzará a hablar de transporte multimodal o intermodal. En la bibliografía revisada existen muchas definiciones de Transporte Intermodal de Mercancías (TIM); un resumen de algunas de ellas se muestran en la Tabla 3.1.

TABLA 3.1: Definiciones de transporte intermodal

Autor	Definición
<a href="#">Jones et al. (2000)</a>	Envío de mercancías y el movimiento de personas envueltas en más de un modo de transporte durante un viaje simple y sin fisuras.
<a href="#">Southworth y Peterson (2000)</a>	Transporte en el que dos o más modos son unidos de principio a fin con el objetivo de transportar mercancías o personas de un punto de origen a un punto de destino.
<a href="#">Van Duin y van Ham (1998)</a>	Movimiento de bienes en una misma unidad de carga o vehículo, que usa sucesivamente varios modos de transporte sin manejo de los bienes en los cambios de modos.
<a href="#">Min (1991)</a>	Movimiento de productos desde el origen al destino usando la combinación de varios modos de transporte tales como aire, líneas oceánicas, navegación de interior, tren o carretera.
<a href="#">Nozick y Morlok (1997)</a>	Movimiento de camiones o contenedores sobre vagones de tren, con transporte por carretera en los tramos finales.

A pesar de haber muchas más definiciones de las mostradas en la Tabla 3.1, esta selección es suficiente para remarcar la existencia de diferencias y matices en las

<sup>1</sup>Vías férreas, carreteras, vías fluviales, vías marítimas, vías aéreas

definiciones de los diferentes autores. En esta tesis se va a realizar una distinción entre transporte multimodal y transporte intermodal. Como Transporte Multimodal de Mercancías (TMM) se entenderá el transporte de mercancías que hace uso de varios modos de transporte, mientras que como Transporte Intermodal de Mercancías (TIM) se tomará la definición adoptada por la [European Conference of Ministers of Transport \(1993\)](#), y por la [European Commission \(1997\)](#):

*«Movimiento de bienes en una misma unidad de carga o vehículo, que usa sucesivamente varios modos de transporte sin manejo de los bienes en los cambios de modos»*

Esta definición resalta las principales características del TIM, que son:

- El uso de sucesivos modos de transporte, normalmente compuesto por un tramo inicial y/o final por carretera, y un tramo intermedio en el cual se hace uso de un modo de transporte diferente: barco, avión, ferrocarril,...
- La utilización de Unidades de Carga (UC) que permanecen inalteradas durante todo el trayecto; es decir, no existe manipulación de la mercancía en los cambios de modo. Como UC se entiende un conjunto formado por la caja, medio móvil utilizado para el soporte de la mercancía, y su contenido, la mercancía. Las unidades de carga suelen ser contenedores, *Swap Bodies*<sup>2</sup> y *trailers*.

La diferencia entre TMM y TIM radica principalmente en la consolidación de la carga. Aunque a priori pudiera parecer un detalle sin importancia, el hecho que la carga este consolidada en UC puede influir enormemente en la competitividad del TIM frente a otros modos de transporte. En los transbordos entre modos, donde se gasta una parte importante del tiempo total del viaje, si la carga está consolidada el transbordo podrá realizarse en menor tiempo y a menor coste, y por tanto aumentará la eficiencia total de la cadena de transporte. Además, el menor consumo de tiempo en la transferencia de la mercancía entre modos aumentará la velocidad percibida del transporte.

El transporte intermodal intenta aprovechar la sinergia entre los modos de transporte involucrados. Por un lado, se usa un modo de transporte con gran flexibilidad, usualmente la carretera, que llevará a cabo los trayectos inicial y final. La operativa de recogida y entrega del contenedor entre terminal y clientes finales suele definirse como remolcado, acarreo o *drayage*. Para el trayecto intermedio, *line-haul*, suelen usarse modos que presenten una mayor economía de escala, por ejemplo el ferroviario o marítimo. Este trayecto intermedio suele ser un porcentaje muy elevado de la distancia total recorrida en el envío.

---

<sup>2</sup>Unidad concebida para el transporte de mercancías y adaptada de forma óptima a la dimensión de los vehículos terrestres y equipada con dispositivos adecuados para el transbordo entre nodos

Un esquema básico del transporte intermodal es presentado en la Figura 3.2. Aunque la infraestructura de carretera permita un envío directo de mercancías entre el cargador A y el destinatario B, el transporte carretera-ferrocarril permite otra alternativa donde un contenedor, semirremolque o caja móvil sale del almacén del remitente hacia la estación intermodal A'. En la estación A' la carga es transferida o transbordada, sin manipulación, a una plataforma ferroviaria. A partir de aquí, se inicia el trayecto ferroviario hasta una estación B', donde la carga pasa de un modo ferroviario a la carretera, lo cual permite que la mercancía llegue al destino B.

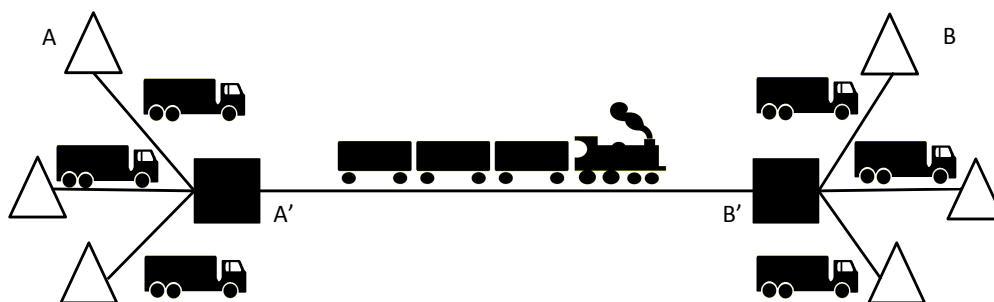


FIGURA 3.2: Esquema del transporte Intermodal de mercancías

## Formas de transporte intermodal

El transporte intermodal es un concepto lo suficientemente amplio como para recoger dentro del mismo diversas formas y variaciones. Terminología ampliamente usada de diferentes formas de transporte intermodal son por ejemplo:

- El transporte intermodal carretera-ferrocarril o *rail-road transport* donde se combinan el transporte por carretera y el ferrocarril, existiendo una transferencia de la unidad de carga entre ambos modos.
- El *ferROUTAGE* o *piggyback traffic* que designa el conjunto de técnicas que permiten cargar camiones completos sobre un tren
- El transporte intermodal marítimo donde la distancia principal es llevada a cabo a través de vías fluviales, canales o el mar
- El cabotaje, transporte marítimo de corta distancia o *short sea shipping* (SSS), que designa el transporte de mercancías por mar entre puertos europeos y puertos de países ribereños de los mares cerrados que sirven de frontera a Europa.
- El transporte intermodal aéreo donde el trayecto principal de la cadena intermodal es llevado a cabo en avión.

## 3.2. La cadena logística del transporte intermodal

Todas las diferentes formas de TIM vistas con anterioridad, aunque difieren en el modo de transporte que lleva a cabo el trayecto principal, suelen compartir la mayor parte de la problemática logística asociada. Es importante por tanto conocer *la cadena logística del transporte intermodal* (CLTI), que representa la secuencia de modos y nodos de transporte que facilitan el movimiento de una carga desde su origen a su destino.

La logística del transporte intermodal debe asegurar en todo momento el envío de la mercancía. Para ello, los modos se conectan entre sí a través de los nodos en tres niveles básicos:

- Nivel físico o infraestructural, por el cual se dota de capacidad a espacios, infraestructuras e instalaciones para acoger distintos tipos de tráfico de material móvil.
- Nivel funcional, por el cual se compatibilizan servicios con sus propios costes, tiempos, frecuencias y modelos de gestión y organización.
- Nivel de conocimiento, por el cual se ordena, genera y difunde la información asociada a la cadena y su entorno.

Cada uno de los eslabones de la CLTI, que abarcan tanto a los modos que llevan a cabo los diferentes trayectos como a los transbordos entre modos, es responsabilidad de uno o varios actores. Estos actores serán, por tanto, responsables del correcto funcionamiento de cada uno de los eslabones de la cadena y/o de la coordinación de la cadena entera.

A continuación se mostrarán los diferentes actores que aparecen en la CLTI, para posteriormente realizar un breve resumen de los procedimientos llevados a cabo en cada uno de los eslabones.

### 3.2.1. Actores de la cadena intermodal

Los diferentes trayectos que componen el transporte intermodal pueden ser gestionados directamente por el cargador, contactando directamente con operadores y organizando el transporte y las operaciones de almacenamiento. Sin embargo, en la mayoría de los casos estas operaciones requieren demasiado esfuerzo para pequeñas y medianas compañías. Por tanto, la opción preferida a veces es la subcontratación a diferentes actores que manejarán el proceso entero.

Los diferentes actores que suelen tomar parte en el proceso intermodal son:

- Cargador (*shipper*): persona o compañía que confía a terceros (agencia, transitorio, operador de transportes, transportista) el “cuidado” de las mercancías hasta ser entregadas al destinatario.
- Mandante (*principal*): persona física o jurídica que confía a un tercero la realización de ciertas actuaciones.
- Destinatario o consignatario (*consignee*): persona responsable de recoger la mercancía.
- Transportista (*carrier*): compañía o persona responsable del movimiento de mercancías, ya sea directamente o a través de una tercera parte.
- Subcontratista (*subcontractor*): tercera parte a la que el transportista ha encargado la ejecución del transporte, o un trayecto del mismo.
- Armador (*shipowner*): propietario real del buque, el cual puede hacer uso del buque para su propio beneficio o alquilarlo para un uso externo.
- Fletador (*chartering agent*): persona física o jurídica que alquila (fleta) un buque para su explotación, en la manera que estime conveniente. El fletador y el propietario real del buque establecen los oportunos contratos que convierten al fletador en el transportista efectivo ante los cargadores.
- Agente marítimo o consignatario (*shipping agency*): responsable del armador o del fletador del buque en el puerto. Realiza todas las gestiones necesarias para el despacho documental frente a las autoridades locales, da atención a la tripulación y al buque, y gestiona los suministros que se precisen. El consignatario, por cuenta del armador, negocia, gestiona, liquida los fletes y gastos ocasionador por la mercancía y firma los documentos de embarque (*Bill of lading*) de la mercancía de exportación y recibe los documentos canjeables por las mercancías descargadas de importación. Las responsabilidades del consignatario son limitadas en cuanto se refiere al incumplimiento de sus representados, siempre y cuando actúe con diligencia en su gestión, mostrando la información y cuentas adecuadas. También puede negociar por cuenta del armador con empresas estibadoras las tarifas correspondientes a la manipulación de mercancías en el puerto y la carga/descarga del buque.
- Estibador (*stovedoring*): empresa o persona que realiza las operaciones de manipulación de la mercancía en tierra. Se encarga de la carga y descarga de los buques. Normalmente es contratada por los agentes del armador/fletador.
- Transitario (*forwarding agent*): es el intermediario que toma las disposiciones necesarias y/o proporciona servicios complementarios para el transporte de mercancías y otros servicios en representación del cargador. Coordina y organiza todas las operaciones del transporte, tratando las mercancías como si fuera su dueño.

El transitario establece contacto con todos los proveedores de servicios vinculados a la actividad del transporte. Es también *agente de aduanas*. La intervención del transitario es bastante útil en el caso de operaciones complejas. Se trata de un especialista del transporte que realizará un control exhaustivo de la operativa seguida y de los costes vinculados a la operación

La imagen del transitario está oficialmente regulada en la mayoría de los países. Sus funciones están claramente definidas en el comercio internacional y se agrupan en la FIATA (*Fédération Internationale des Associations de Transitaires et Assimilés*).

- Agencia de Transportes (*transport agency*): intervienen en la contratación del transporte internacional realizando la gestión y contratación del mismo. Pueden desarrollar su actividad contratando los medios de transporte que necesiten, ya que no disponer de vehículos propios es condición indispensable para efectuar esta gestión. Actúa como transportista frente al exportador/importador y como cargador frente a los transportistas cuando contrata sus servicios.
- Operador de transporte multimodal (*multimodal transport operator*). El transporte multimodal ha dado paso a esta figura, que puede ser una persona física o jurídica, una compañía naviera, un operador de ferrocarril o un transitario especializado que adquiere el compromiso frente al cargador o destinatario como transportista principal y es el emisor del documento unificado de todos los medios y modos de transporte utilizados y asume todas las responsabilidades de la ejecución del contrato.
- Agente de Aduanas (*customs agent*): es la persona física o jurídica facultada por la dirección de aduanas para tramitar la documentación necesaria en el despacho de exportaciones e importación de las mercancías así como efectuar los pagos de aranceles, impuestos, obtención de licencias, certificados, frente a las autoridades aduaneras por cuenta del usuario, exportador o importador.

### 3.2.2. Etapas de la cadena intermodal

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, la CLTI está compuesta por varios trayectos que serán llevados a cabos por diversos modos de transporte. La transferencia de mercancía entre trayectos será efectuada en distintos tipos de terminales. Toda esta cadena logística requiere de una enorme cantidad de pasos a efectuar por los distintos actores involucrados, con el fin de asegurar el transporte. Una explicación de distintos eslabones de la cadena es mostrada a continuación.

### 3.2.2.1. Recepción, verificación y confirmación del servicio de transporte

La cadena comienza en el departamento comercial de la empresa que vaya a gestionar el envío intermodal, donde tiene lugar el inicio de la relación cliente-empresa y todo lo que esto conlleva. La empresa de transporte, o el actor de la cadena que corresponda, recibirá una petición de servicio de transporte.

Una vez han sido recogidos los datos sobre la petición de servicio de transporte, el jefe de tráfico deberá examinar la disponibilidad de llevar a cabo el mismo dependiendo de las exigencias del cliente y de las condiciones negociadas del transporte. Al tratarse de un transporte intermodal, el jefe de tráfico tendrá que coordinar los distintos medios de transportes que van a participar en la secuencia intermodal hasta que el envío llegue al punto de destino. Por lo tanto, el jefe de tráfico necesita confirmar la disponibilidad de todos los medios que sean necesarios para la realización del transporte.

Si es posible realizar el transporte se confirma al cliente la aceptación del servicio y se contrata el mismo.

### 3.2.2.2. Proceso de contratación e Incoterm

En el departamento comercial comienza el proceso de contratación. El *Contrato de Transporte* consiste en un acuerdo de voluntades entre un operador de transporte y un usuario del servicio de transporte, por el cual el primero se compromete a transportar la carga desde un determinado lugar de origen hasta el destino final que se le indique, a cambio de un precio determinado o *flete*.

El contrato debe consignar:

- Lugar y fecha de su celebración.
- Nombre y dirección del operador de transporte, del embarcador y del consignatario.
- Lugar y fecha en que fue recibida la mercancía por el operador de transporte, y lugar de destino donde deberá ser entregada.
- Descripción de la carga (tipo, naturaleza, cantidad, volumen, peso bruto y neto, embalaje, marcas especiales, tipo de unitarización y valor declarado de la mercancía).
- Costes de transporte y movimiento de los intereses por demora en la entrega.
- Instrucciones del embarcador al operador de transporte con relación a la carga.
- Lista de documentos entregados al operador de transporte.
- Instrucciones y datos específicos de cada modo de transporte.
- Obligaciones del comprador y vendedor, y transferencia de costes y riesgos.

Todos los contratos de transporte están regidos por normas nacionales e internacionales y se formalizan en documentos cuyo formato varía según el modo de transporte.



Dentro del proceso de contratación tendrán un papel clave los Incoterms, normas acerca de las condiciones de entrega de las mercancías. Los Incoterms son unos términos publicados por la Cámara de Comercio Internacional (CCI) que definen cuáles son las condiciones de entrega de la mercancía en las operaciones de compraventa internacional. Son reglas de aceptación voluntaria por cada una de las partes y pueden ser incluidas en el contrato de compraventa internacional. Desde el 1 de enero de 2011, están en vigor los Incoterms 2010.

Mediante la utilización de los Incoterms, en caso de conflicto quedan claramente establecido el límite de responsabilidades y obligaciones de las partes que intervienen en la operación. Tienen como finalidad la delimitación de:

- Quién asume los diferentes gastos y costes que se generan en el envío de la mercancía desde la fábrica o almacén del vendedor hasta las instalaciones del comprador.
- El lugar dónde se produce la entrega, puesta o disposición de la mercancía.
- El responsable de los términos administrativos y aduaneros de la operación de exportación o importación.
- Quién debe aceptar el riesgo de deterioro o daño del envío y hasta qué momento.

### 3.2.2.3. El acarreo terrestre

Una vez establecidos los términos del contrato se solicitará al expedidor de la mercancía, que puede coincidir con el cargador o no, la documentación necesaria que requiera de antemano cada modo que participe en la cadena intermodal.

En la mayoría de los casos, el primero de los modos será el acarreo terrestre, que consistirá en el traslado por parte del transportista de la mercancía desde el origen a la terminal. De igual modo este modo de transporte también suele ser el último, y ocupará el transporte desde la terminal al destino.

Los operadores ferroviarios, marítimos y aéreos pueden ofrecer al cargador el servicio de realizar el acarreo terrestre, ocupándose del transporte de la mercancía desde que entra en su terminal hasta el destino final, o desde el origen a la terminal. En estos casos estos servicios suelen realizarse a través de subcontratas.

La compañía de transportes deberá organizar y programar el orden en el que tendrán lugar los distintos servicios que tenga que realizar. De hecho, una buena planificación del acarreo o *drayage* podrá reducir considerablemente los costes (Ver Capítulo 5)

Los conductores que realizarán el transporte pueden ser: conductores asalariados que forman parte de la plantilla de la empresa; socios conductores que forman parte

de una empresa, normalmente una cooperativa, y que pueden tener chóferes asalariados que trabajen para ellos; o proveedores de servicios de transporte, terceros o subcontratados, que pueden ser autónomos o una empresa de transportes.

Una vez asignado vehículo y conductor, se le dan todas las instrucciones de carga y descarga pertinentes, así como la documentación necesaria para realizar el transporte. La orden de carga no tiene un modelo específico

La empresa de transportes deberá confirmar que el conductor va en la fecha indicada dentro del horario de carga de las instalaciones. Una vez que el conductor llega al punto de carga, solicita la carga de la mercancía y entrega la autorización de carga. La carga del vehículo podrá ser efectuada por los operarios de la instalación o por el conductor del vehículo.

Una vez cargado, se le entrega al conductor la documentación de la carga: albarán y carta de porte. En el caso de tratarse de mercancía peligrosa también se le entregará una ficha de seguridad y declaración de mercancías peligrosas. De la carta de porte se expedirán tres copias originales, firmadas por el remitente y el transportista; una copia para cada una de las partes involucradas y una tercera copia que acompañará a la mercancía hasta su punto de destino. El vehículo cargado, antes de efectuar su salida hacia la terminal, ha de ser pesado para comprobar que su peso bruto está dentro de los índices permitidos.

#### **3.2.2.4. Transbordo en terminales y trayecto principal**

Una vez que la mercancía llega a la terminal, el proceso a seguir dependerá del tipo de terminal.

##### ***Terminales ferroviarias***

La mercancía al llegar a la terminal ferroviaria es pasada por la báscula; en ese momento se entrega al operador ferroviario la documentación que es portada por el conductor y este recibe un albarán de recepción de la mercancía por parte del operador ferroviario, para que pueda justificar la entrega de la mercancía en la terminal.

A continuación se procede al transbordo del contenedor al vagón correspondiente. En caso de que no queden vagones que puedan ser usados, el contenedor pasará a la playa de la terminal ferroviaria, donde permanecerá a la espera de ser trasladado a un vagón cuando corresponda.

Una vez el contenedor haya sido depositado en el tren, se comenzará el transporte ferroviario hasta la terminal ferroviaria de destino. El contenedor irá siempre acompañado por la documentación que corresponda.

Cuando el contenedor llega a la estación de destino, la persona o empresa encargada del acarreo terrestre deberá comunicar por fax a la estación de destino la solicitud de entrega del contenedor para que el transportista pueda retirarlo. El acarreo terrestre puede ser contratado con el operador ferroviario o un transportista, o bien puede ser realizado por un transportista propio.

En el momento que corresponda se procede a la retirada del contenedor y se realiza el transporte terrestre hacia el punto de destino, donde se descargará la mercancía y se sellará el albarán que acompaña a la carga, siendo enviado a la empresa de transporte (por carretera) para confirmar que la carga ha llegado a su destino.

Puede darse el caso que al llegar a la terminal ferroviaria de destino, el siguiente trayecto de la cadena intermodal no corresponda a un acarreo por carretera. En este caso, se procederá según corresponda con el modo de transporte que venga a continuación.

### ***Terminales marítimas***

Los actores que normalmente intervienen en la actividad portuaria son el armador, el fletador, el transitario, el agente de aduanas, el consignatario y la empresa estibadora. La secuencia de acontecimientos que tienen lugar en una terminal marítima será descrita a continuación.

Una vez llega el vehículo a la terminal portuaria, el transportista entrega la documentación pertinente. En caso de tratarse de una terminal de contenedores, la documentación será entregada en el control de acceso a la entrada del puerto.

Tras pasar el control de acceso, la mercancía se dirige a báscula en el caso de tratarse de mercancía general. Si la mercancía transportada es considerada mercancía peligrosa, la empresa de transporte debe comunicar con 48 horas de antelación al embarque la llegada del vehículo, para que la autoridad portuaria le permita el acceso al puerto. La autorización de manipulación de mercancía peligrosa dependerá del muelle.

Tras descargar la mercancía en la terminal, debe identificarse al propietario de la mercancía o a su representante a través de la nota de embarque donde se especifica el nombre del consignatario.

Una vez que el vehículo pasa por báscula, el transportista traslada la carga al recinto de la playa del estibador correspondiente entregándosela a éste. Previamente, el agente consignatario de la naviera encargada de realizar el transporte marítimo entrega al estibador información sobre los medios de descarga del buque para que pueda prever la necesidad de grúas y personal. También le entregará en nombre del armador, y como depositario de la mercancía, el documento denominado *entréguese*, imprescindible para que la Terminal Portuaria de destino entregue el contenedor al transportista de-

signado. Dicho documento sólo se facilita una vez han sido satisfechos todos los gastos relacionados con el transporte y manipulación de la mercancía.

Una vez que la mercancía pasa a manos de los estibadores, comienzan las actividades propias del grupaje marítimo<sup>3</sup>. Después, los contenedores deberán ser transportados a la zona aduanera para realizar el *despacho de aduanas*, finalizado el mismo la mercancía podrá salir del recinto aduanero y será trasladada hasta la zona portuaria de grúas donde se procederá al embarque y la trinka del contenedor en el buque asignado.

Cuando el buque llega al puerto de destino, se realizan exactamente las mismas actividades que se realizaron en el puerto de origen, pero en sentido inverso. Un cambio que se produce, es que el despacho aduanero es realizado ahora por el agente contratado por el destinatario de la mercancía.

Finalizado todo, el transportista terrestre designado traslada la mercancía al punto de destino. Una vez realizada la descarga, el transportista traslada el contenedor de vuelta al puerto, donde previamente se le ha enviado por fax el documento *admítase*, para poder realizar el posterior retorno del contenedor vacío a la terminal o al depósito de contenedores.

La terminal portuaria deberá sellar el certificado para que la empresa de transporte por carretera pueda enviarlo de nuevo al puerto de origen poder repetir la rotación del contenedor.

### ***Terminales aéreas***

La terminal de carga aérea funciona de un modo parecido al resto de terminales que se han comentado con anterioridad.

Si interviene el transporte aéreo, el cargador de la mercancía se pone en contacto con la compañía aérea. La comunicación se realiza por teléfono, dando la información sobre los kilos, número de bultos (para ver si hay espacio en la aeronave), y destino. El tipo de servicio contratado dependerá también de la urgencia del transporte repercutiendo directamente en el precio.

La compañía aérea, o bien un agente IATA autorizado, le proporciona al cliente el número de conocimiento aéreo o carta de porte. Las funciones básicas de éste son la de prueba de contrato del transporte, acuse de recibo de las condiciones en las que se recibió la mercancía, declaración del despacho aduanero, guía de instrucciones para el transportista y certificado de seguro (opcional). Son tres copias originales del documento, y entre 6 y 12 copias adicionales para uso interno. Dentro de la terminal de carga aérea se realizan diversas operaciones: operaciones a nivel informático, contacto con el avión,

---

<sup>3</sup>Consolidación en contenedores de la carga de varios consignatarios

combustible, realización de la hoja de carga, distribución de la carga (*sorting*), escaneado de la carga (realizado por los agentes de carga, que miden e introducen los datos) y posterior centrado del avión. También se realiza un control de vuelo.

Cuando la mercancía viene como unidades completas de carga, pasan directamente al interior de los contenedores aéreos sin pasar por almacén. Si no es así deberán pasar antes por éste. Una vez llenos todos los contenedores, pasan a la rampa de atención de contenedores para ser embarcados en el avión.

Al igual que en los modos anteriores, la mercancía debe pasar un despacho de aduanas antes de poder ser embarcada.

### 3.3. ¿Es la intermodalidad la solución?

Actualmente, y como se vio en el capítulo 2 el desequilibrado sistema de transporte de la UE supone unos importantes efectos externos negativos, siendo el más visible la congestión de las carreteras; y es que el incremento que el transporte de mercancías ha experimentado en las últimas décadas ha sido absorbido casi en su totalidad por el transporte por carretera.

Además de la congestión, existen otras importantes razones para buscar alternativas al transporte de mercancías por la carretera. Una de las razones sería, según datos de la UE, que el mantenimiento de las autopistas se reduciría a un sexto de los costes actuales si sólo fueran usadas para el transporte de viajeros. Otras razones interesantes son las debidas a temas medioambientales y de accidentalidad; basta con mirar el epígrafe 2.3.3 para darse cuenta de esta necesidad.

En este sentido, el objetivo de la política común de transportes de la UE es promover la movilidad sostenible, es decir, promover servicios de transporte eficiente, adecuados en costes, seguros, ambientalmente limpios y socialmente aceptados. Los objetivos actuales de la política europea de transporte (Ver epígrafe 2.4) van dirigidos a equilibrar el actual reparto entre de los modos de transporte, para transferir cierto volumen de tráfico por carretera a modos alternativos de transporte y de este modo:

- Descongestionar las carreteras.
- Reducir el consumo energético.
- Proteger el medio ambiente.
- Aumentar la seguridad.

La UE ha señalado a la intermodalidad como principal modo para solucionar los problemas existentes en la RTE-T, pero ¿por qué señala la CE a la intermodalidad como solución a la sostenibilidad del transporte? ¿es realmente la intermodalidad la solución?

En este capítulo se ha comentado con detalle que significa transporte intermodal y como se lleva a cabo la CLTI, de este modo se puede tener un mayor conocimiento si realmente es la intermodalidad la solución a la problemática existente en el transporte de mercancías.

La UE no pretende potenciar un modo en concreto, sino potenciar un reparto más equitativo. Existen tres razones principales por las cuales la intermodalidad se presenta como solución: por necesidad, por eficacia, y por interés social.

Por **necesidad** dado la imposibilidad de transportar mercancías entre dos puntos cualesquiera del planeta usando solamente un modo de transporte; debido a la cantidad de barreras tanto geográficas como de infraestructuras. Esto se hace claramente evidente cuando se trata de transportes transoceánicos o intercontinentales. El TIM tiene la capacidad de transportar la mercancía puerta a puerta (*door-to-door*).

Por **eficacia** al tratar de potenciar, buscando sinergias, la colaboración entre modos como alternativa a la competencia entre ellos. Es una cuestión de comercio y de movilidad en la que cada modo de transporte contribuye a hacer óptimo el conjunto del sistema de transporte. Se trata de potenciar las ventajas y reducir los inconvenientes en cada modo. De esta forma, en un transporte carretera-ferrocarril, se busca la flexibilidad del camión frente al ahorro económico del ferrocarril (Morlok y Spasovic, 1995).

La intermodalidad aprovecha enormemente las economías de escala, su propia red suele estar configurada para potenciar este factor presentando usualmente la configuración *hub & spoke* (Bontekoning, 2006).

Por ejemplo, para los grandes buques oceánicos (*mother vessel*) de contenedores, no produce ninguna beneficio económico escalar en una multitud de puertos y operar en cada uno de ellos una cantidad pequeña del total de contenedores que llevan a bordo. Es más operativo hacer uso de *buques alimentadores* que suministran desde los grandes puertos oceánicos a puertos de sus alrededores. Esto suele ser llamado *servicio de aporte*.

Y por último, por **interés social** al presentar una serie de características que la hacen muy atractiva desde una mira política y de la ciudadanía. La intermodalidad puede contribuir en gran parte a la reducción de la congestión (Van Schijndel y Dinwoodie, 2000) y accidentalidad que presentan nuestras carreteras. De la misma manera puede ayudar a la disminución de la contaminación atmosférica (Kreutzberger et al., 2003; Liao et al., 2009).

Que la intermodalidad puede llegar a ser una realidad se pone de manifiesto al examinar casos reales de éxito llevados a cabo por diferentes empresas europeas. Kraft, BASF, Siemens, IKEA, etc. ya han introducido el transporte intermodal en sus respectivas cadenas de suministro (European Commission, 2000)

### **3.4. Resultados de interés para el desarrollo de la tesis**

En este capítulo se ha definido el concepto de transporte intermodal, detallándose los distintos eslabones de su cadena logística. El transporte intermodal supone pasar de las tradicionales políticas unimodales, que consideran cada modo de transporte de forma individualizada, a una concepción integral del sistema de transportes. Se busca potenciar cada uno de los modos y el transporte en conjunto.

Conocer el funcionamiento de la cadena logística intermodal es imprescindible para saber cuales son las fortalezas y debilidades que este tipo de transporte presenta. Y de este modo poder justificar la necesidad del mismo.





# Capítulo 4

## El mercado actual del transporte intermodal y líneas para su mejora

En los capítulos anteriores se ha visto la insostenible situación por la que atraviesa el transporte de mercancías en toda la Unión Europea y en España, así como la propuesta de las distintas instituciones que señalan a la intermodalidad como el catalizador clave en el cambio de paradigma que esta cuestión necesita.

La intermodalidad surge como respuesta a la búsqueda de un modo alternativo al transporte por carretera. Aunque la intermodalidad resulta ser ventajosa en conjunto, muchas de estas ventajas no siempre pueden ser percibidas por los usuarios finales, de modo que no afectan directamente al nivel de mercado que este modo de transporte es capaz de captar. Es necesario por tanto analizar que potencial real tiene la intermodalidad como alternativa de transporte. Conocer qué tipos de mercancías son susceptibles de ser transportadas, qué condiciones de servicio deben darse, qué estrategia de precios seguir, etc. es fundamental para poder conocer los posibles nichos de mercado y la demanda de los mismos.

De igual modo es necesario conocer que atributos (coste, seguridad, tiempo, puntualidad, etc.) del transporte han influido en la elección de los usuarios, de modo que una vez analizados, puedan servir para adaptar el servicio a las necesidades reales de sus usuarios y aumentar por tanto la competitividad del transporte intermodal de mercancías con respecto a otros modos de transporte.

Este capítulo intentará dar respuesta a las preguntas planteadas anteriormente. Primero, se revisarán los estudios que se han realizado en los últimos años sobre la demanda y mercado del transporte intermodal de mercancías, y se analizarán los atributos clave a la hora de realizar una elección modal y los factores que influyen en estos. Seguidamente, se propondrá un modelo matemático de elección modal que será aplicado a un caso particular en España, estableciéndose así los límites de la viabilidad del transporte

intermodal en este caso particularizado. De este modo, uniendo ambas cosas, se podrán sacar conclusiones sobre el actual reparto modal y sobre los cambios necesarios para la atracción de un mayor mercado. Posibles líneas de mejora en el transporte intermodal, que puedan potenciar su situación actual, son mostradas en el último epígrafe de este capítulo.

#### **4.1. Las claves de la elección modal y su influencia sobre el mercado intermodal**

La determinación de la demanda que un determinado servicio de transporte puede alcanzar ha sido un tema de estudio desde hace años ([Winston, 1983](#); [Allen, 1977](#)). Generalmente el usuario de un modo de transporte busca en él una serie de propiedades, atributos, que lo diferencie de sus competidores. Entonces, ¿cuáles son las propiedades que influyen en la elección modal?

Existe una amplia literatura en relación a esta importante cuestión, la mayoría de los cuales realizan sus estudios entre diferentes modos de transporte, diferentes agentes y diferentes productos. [Harper y Evers \(1993\)](#) señalan como atributos de especial importancia la disponibilidad del servicio, la calidad del mismo, el coste y la percepción que los consumidores tienen del mismo. Continuación del anterior estudio, [Evers et al. \(1996\)](#) miden la percepción que los consignadores tenían de distintos modos (ferrocarril, carretera y transporte intermodal) a través de la realización de una serie de encuestas para valorar la importancia de distintos elementos; siendo el tiempo, la disponibilidad del servicio, el contacto con la firma responsable del servicio, la restitución en caso de pérdida y el coste los atributos analizados. [Danielis et al. \(2005\)](#) analizan el coste, el tiempo de viaje, la puntualidad y la posibilidad de daños y pérdidas a través de un estudio de preferencias declaradas. A través de otro estudio de preferencias declaradas, [Norojono y Young \(2003\)](#) comparan el transporte ferroviario y el transporte por carretera, donde los principales atributos analizados son el coste, el tiempo medio de entrega, la calidad del servicio (fiabilidad del tiempo de tránsito, seguridad y tiempo de acceso a las terminales) y la flexibilidad del servicio (frecuencia del mismo y horario de salida). [Shinghal y Fowkes \(2002\)](#) usan *the leeds adaptive stated preference software* ([Fowkes y Shinghal, 2001](#)) para presentar unos resultados empíricos sobre elección modal en la India.

Resumiendo lo expuesto en la literatura existente, las propiedades más repetidas en los análisis de elección modal son el coste, el tiempo de realización del servicio, la puntualidad, la flexibilidad y la seguridad.

En general los consignatarios dan un menor mercado a la intermodalidad que al transporte por carretera ([Evers et al., 1996](#); [Danielis et al., 2005](#); [Norojono y Young,](#)

2003), pero una mayor ventaja a este que al transporte por ferrocarril puro, debido principalmente a su posibilidad de transporte puerta a puerta.

El principal mercado del transporte de mercancías intermodal se ciñe a los usuarios del transporte que dan mayor importancia al coste (Tsamboulas y Kapros, 2000), habiéndose realizado diferentes estudios que determinan bajo que condiciones es realmente rentable la intermodalidad (Morlok y Spasovic, 1994; Spasovic y Morlok, 1993; Fowkes et al., 1991; Nierat, 1997; Janic, 2007).

Aunque el coste es un atributo fundamental, en muchas ocasiones se suele dar especial importancia a atributos relacionados con la calidad como son el tiempo de tránsito y la disponibilidad (McGinnis, 1990; Shinghal y Fowkes, 2002). Esto es debido principalmente a restricciones temporales o bien de las mercancías, o bien de los plazos de entrega. Estas restricciones temporales en algunas ocasiones pueden ser salvadas a través de la correcta planificación del transporte (Kiesmuller et al., 2005).

Las prioridades respecto a cada uno de los atributos del transporte anteriormente mencionados será más acentuadas dependiendo del tipo de mercancía a transportar. Hay que ser conscientes que no todos los tipos de mercancías son susceptibles de ser transportadas en las condiciones actuales de mercado a través del transporte intermodal. Diferentes estudios analizan qué tipos de mercancías o qué características deben presentar éstas para ser potencialmente transportadas a través del transporte intermodal (Morash et al., 1977; Nierat, 1997; Shinghal y Fowkes, 2002; Beuthe et al., 2001).

El mercado estará influenciado también por la tecnología usada para realizar el transporte intermodal y por los modos de transporte que en él participan. Excluyendo los casos en los que aparece la intermodalidad por una estricta necesidad, dado que es imposible realizar el transporte de otro modo, el mercado podrá variar de transportar sólo contenedores o *trailers* enteros (Beier y Frick, 1978; Morash et al., 1977), o si el mismo se realiza por ferrocarril, por cabotaje, o a través de transporte fluvial (Konings y Ludema, 2000).

Es necesario en este punto hacer énfasis en una cuestión de gran importancia; la intermodalidad surge en gran parte como modo alternativo al transporte por carretera que trata de paliar los efectos negativos que éste presenta: congestión, efectos perjudiciales para el medio ambiente, aumento de la accidentalidad, etc. Sin embargo, ninguna de estas cuestiones suele influir en la decisión sobre el modo de transporte a utilizar; al menos mientras los usuarios de transporte no paguen todos los costes que realmente generan, ya que la estructura de precios no refleja ni estos costes externos, ni otros como el coste de las estructuras necesarias. Incluir estos costes provocaría un gran aumento de la rentabilidad económica del transporte intermodal, y por lo tanto un aumento de su mercado.

## 4.2. Diferentes atributos del transporte intermodal

En el anterior apartado, se comentó que el coste, el tiempo de tránsito, la puntualidad, la flexibilidad y la seguridad eran los principales atributos tenidos en cuenta por los usuarios del transporte a la hora de realizar una elección modal. En este epígrafe se pretende extender la información con respecto a cada uno de ellos, explicando de que factores dependen, y como pueden influir en la elección del transporte.

### 4.2.1. Los costes

La estimación del coste en el transporte es fundamental tanto para las compañías como para las instituciones públicas. Se trata de uno de los principales mecanismos que se posee para el establecimiento de precios, tipo y frecuencia de servicios, tamaño de vehículos, nivel de inversión, estructura de red, alianza entre empresas, etc. Un completo estudio sobre los costes del transporte intermodal se muestra en [Ricci y Black \(2005\)](#), que analizan tanto costes internos como costes externos.

Intimamente ligado a los costes está el establecimiento de los precios del servicio. Hay que ser conscientes de la diferencia entre costes y precios. El coste es el conjunto de gastos necesarios para la producción del servicio de transporte intermodal; considérense carburantes, personal, amortización de los bienes necesarios para la realización del servicio, etc. El precio es el valor monetario exigido como contraprestación del servicio de transporte. El análisis de costes es interesante desde el punto de vista de la empresa que realiza el servicio, que necesita conocer el gasto que incurre al prestar determinado servicio de forma que, una vez añadido a este el margen de beneficio que se considere oportuno, pueda informar de su tarifa al cliente que se la reclame. El precio es interesante desde las miras del usuario del transporte.

Una gran parte de los problemas de competitividad del TIM es la determinación de tarifas correctas, lo que es llamado estrategias de precios. La determinación de las tarifas se puede enfocar de dos formas distintas: o bien existe una estrategia de precios para cada uno de los eslabones de la cadena intermodal ([Horn, 1981](#); [Yan et al., 1995](#); [Spasovic y Morlok, 1993](#)); o bien se establece una estrategia de precios determinada como un todo, para un servicio intermodal puerta a puerta ([Tsai et al., 1994](#); [Li y Tayur, 2005](#)).

#### 4.2.1.1. Distancia de ruptura

Una de los atributos más llamativos del transporte intermodal es su menor coste respecto a otros modos de transporte. Sin embargo, la propia estructura organizativa

del TIM, vista en el Capítulo 3, hace que esta característica no sea cierta bajo cualquier circunstancia.

El TIM necesita de una transferencia de la mercancía de un modo a otro, lo cual supone un coste de operación durante el cual la mercancía no se desplaza. El incremento del coste debido a los transbordos hace que el TIM parta en desventaja respecto a otros modos; presentando este unos costes fijos más elevados que el transporte por carretera. Sin embargo, existe cierta distancia, denominada *distancia de ruptura*, a partir de la cual la economía de escala existente en el ferrocarril o en la navegación hace que el transporte intermodal llegue a ser más conveniente desde el punto de vista económico que el transporte por carretera. Como se observa en la Figura 4.1, para distancias cortas, inferiores a la *distancia de ruptura*, el transporte por carretera sigue siendo más competitivo que la intermodalidad, mientras que para distancias superiores a la misma sería la intermodalidad la mejor opción.

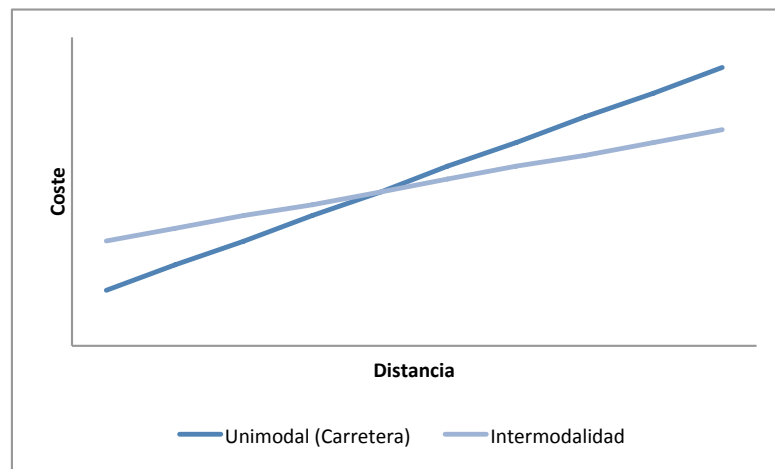


FIGURA 4.1: Distancia de ruptura del TIM

El establecimiento de dicha distancia, puede llevarse a cabo o bien a través de la comparación directa de la función de costes de los modos transportes bajo análisis (Janic, 2007), o bien siguiendo métodos algo más elaborados (Fowkes et al., 1991; Nierat, 1997).

Nierat (1997) para conocer la rentabilidad del transporte intermodal desarrolla la teoría del área de mercado; según la cual se realiza una comparación de costes entre dos modos de transporte, transporte por carretera y *piggyback*, para establecer posteriormente fronteras de elección según la conveniencia económica.

Nierat compara, dado un origen A desde el cual se desea enviar la mercancía hasta un destino B (ver Figura 4.2), los costes de realizar el envío directamente y de enviarlos a través del transporte intermodal. Para el caso del envío por carretera, evalúa unos costes fijos y unos costes variables dependientes de la distancia euclídea entre A y el destino B. En el caso del transporte intermodal, el problema es analizado, en lugar de

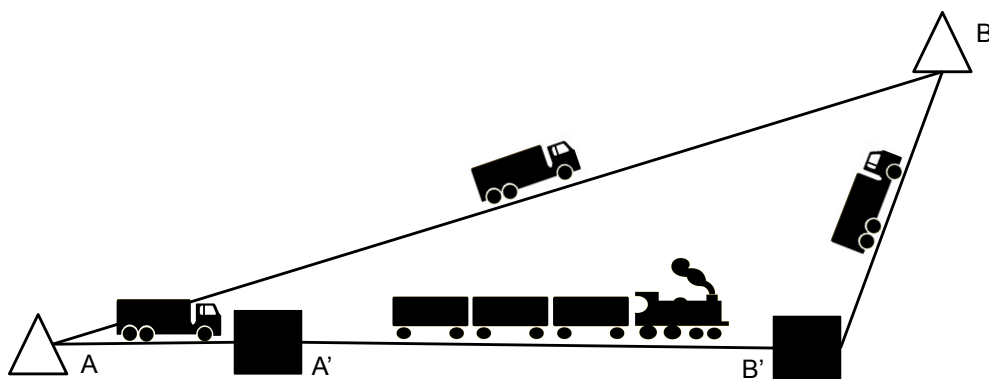


FIGURA 4.2: Posibles elecciones en el enfoque de Nierat

desde A, desde la terminal B'. Los costes de la expedición desde A hasta B' se consideran costes fijos. Sin embargo, los costes desde B' hasta B dependerá de la localización del destino y serán por lo tanto variables dependiendo nuevamente de la distancia euclídea. En ambos casos, se considera el coste como la suma de una parte fija y otra variable, la cual dependerá linealmente de la distancia recorrida por carretera.

Para determinar el área de mercado del transporte intermodal se presentan los costes variables de las dos formas de transportes como dos conos invertidos cuyos vértices reposan sobre la parte fija del coste unitario (ver Figura 4.3). Se puede observar que en el caso del transporte por carretera, dicho cono se sitúa sobre el origen A, donde a un pequeño coste unitario fijo,  $h_A$ , se añade el coste unitario por kilómetro recorrido. En el caso del transporte combinado, el cono se sitúa en la terminal B', donde el componente fijo del coste unitario,  $h_{B'}$ , es la suma de unos costes fijos mayores. La proyección en el plano de la intersección de ambos conos delimita el área alrededor de la terminal para la cual resulta más económico el uso de la intermodalidad que el transporte por carretera (Ver la parte sombreada de la Figura 4.3).

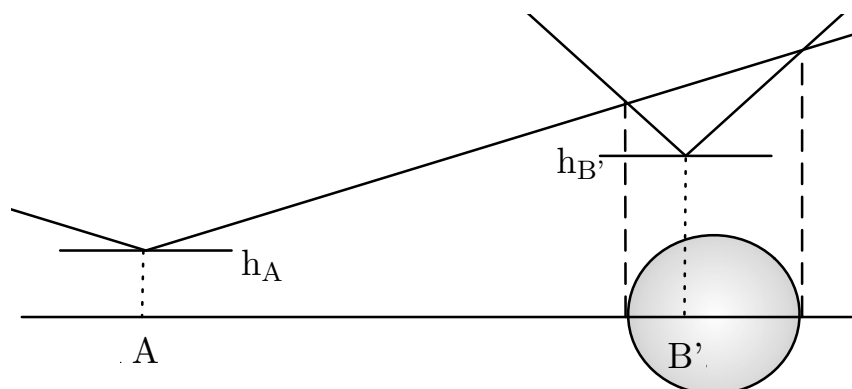


FIGURA 4.3: Área de mercado del transporte intermodal

Fowkes et al. (1991) realizan un estudio de la influencia de la posición rela-

tiva de terminales respecto al origen y destino. Definen un modelo espacial para ver qué distancias hacen competitivo en términos de costes el transporte intermodal frente al transporte por carretera, y utilizan dicho modelo para validar su estudio de preferencias. Calculan la distancia por carretera,  $D_1$  entre un origen O y un destino D, que pueden ser conectados intermodalmente por dos terminales de ferrocarril  $T_1$  y  $T_2$  (ver Figura 4.4). La distancia  $D_1$  puede ser estimada trigonométricamente según la ecuación (4.1).

$$D_1 = \sqrt{[D_2 \cdot \sin(A_2) - D_3 \cdot \sin(A_1)]^2 + [TT + D_2 \cdot \cos(A_2) - D_3 \cdot \cos(A_1)]^2} \quad (4.1)$$

Comparando los costes por carretera,  $C_{CARR}$ , obtenidas a través de ecuaciones de regresión semilogarítmicas del tipo  $\log(C_{CARR}) = a + b \cdot D_1$ , con los costes del transporte combinado,  $C_{TIM}$ , estiman la distancia a partir de la cual es rentable el TIM.

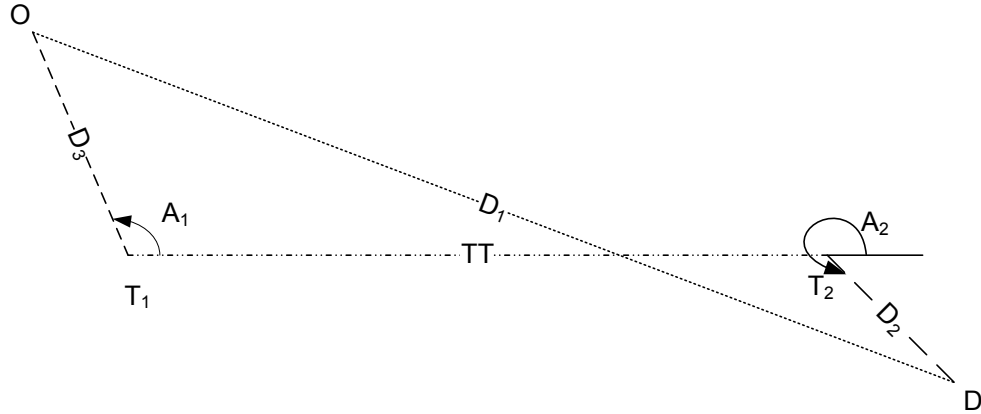


FIGURA 4.4: Área de mercado del transporte intermodal

Es lógico deducir que el valor de dicha distancia estará influenciado por una serie de factores. Sin embargo, de un modo orientativo la mayoría de los autores establecen como valor límite de competitividad para la intermodalidad una distancia que se mueve en una horquilla de 600-900 Km (Morlok y Spasovic, 1994; Spasovic y Morlok, 1993; Fowkes et al., 1991; Nierat, 1997; Janic, 2007).

#### 4.2.1.2. Factores que influyentes en los costes

Como se comentó con anterioridad existe una serie de factores que pueden alterar considerablemente los costes del transporte intermodal, afectando o bien a los costes fijos del transporte o bien a la pendiente de los costes variable.

Nierat (1997) considera tres factores clave atendiendo a la rentabilidad del transporte intermodal: los servicios de acarreo en la terminal, el trayecto *long-haul*, y el

tipo de mercancía.

Los servicios de acarreo estarán marcados por dos parámetros: el número de operaciones diarias por conductor y la proporción de camiones en vacío. Atendiendo a la Figura 4.3, el número de operaciones realizadas por un conductor al día influye en los costes fijos del transporte, lo que causa un cambio en la altura del cono en la terminal; sin embargo, la proporción de camiones que realizan trayectos en vacío influye en la rentabilidad de la terminal cambiando la pendiente del cono, y por lo tanto, cambiando la forma del área de influencia de la terminal.

El tipo de mercancías esta principalmente determinado por el peso de las mercancías y la asimetría en el tráfico a larga distancia. Según Nierat (1997) su influencia se debe principalmente a la estructura de precios propuestas por los operadores de TIM, proporcionales al peso bruto de los vehículos cargados y con precios especiales para vehículos vacíos; mientras que en el transporte por carretera la diferencia de costes respecto a la carga es mínima. Por tanto, considera que el TIM es más atractivo para cargas ligeras y flujos asimétricos, mientras que el transporte por carretera lo es más para cargas pesadas y flujos equilibrados.

Como ya se mencionó al principio del epígrafe uno de los factores más influyentes en la rentabilidad del TIM es la distancia entre origen y destino; siendo el TIM sólo rentable a partir de una determinada distancia de ruptura, por tanto, la distancia del trayecto principal será algo determinante.

Fowkes et al. (1991) comparan el transporte por carretera con varios sistemas intermodales. Consideran que factores como el tipo de contenedor (ISO, *swap bodies*, etc.), la localización de las terminales, o la longitud de los trenes, influyen en los costes intermodales. Por ejemplo, estiman que trenes de longitud cortas (45 TEUs) son más rentables en distancias cortas, mientras que los trenes de gran capacidad (90 TEUs) son más rentables a mayores distancias.

Morlok y Spasovic (1995) señalan la planificación del acarreo terrestre como el principal motivo de gastos del transporte intermodal e identifican diferentes factores que influyen en dicha planificación. De dichos factores son destacable los siguientes: (a) el factor de utilidad conductor/tractor, influenciado por el número de horas de conducción y por el tipo de contrato de los conductores (Morlok y Spasovic, 1994); (b) el factor de carga, a mayor porcentaje de carga mayor porcentaje de movimientos en lleno y por tanto mayor rentabilidad; (c) la distancia, que influirá de manera lineal en el coste; (d) la velocidad de la carretera, que determinará en gran medida la localización de la terminal intermodal; (e) el plan de operaciones, *stay with* o *drop&pick*, que influirá tanto en el factor de carga como en el número de operaciones por conductor; (f) el retraso en los accesos a las operaciones; (g) y otros costes como son la amortización de los camiones y contenedores y las indemnizaciones por retrasos en las entregas, especialmente en bienes perecederos.



Recompilando todo lo expuesto se pueden clasificar los factores de los que depende el coste del TIM en cuatro grandes grupos: factores geográficos, la mercancía, factores organizativos y factores tecnológicos:

- Los *factores geográficos* hacen referencia a cuestiones tales como la ubicación de las terminales, distancias entre las mismas, localización de los destinatarios finales, etc.
- El tipo de *mercancía* (productos perecederos, piensos, tuberías, metalurgia, productos químicos, textiles, etc.) influirá en la clase de contenedor a usar; y su volumen y densidad, en la carga máxima que los contenedores podrán acometer.
- Los *factores organizativos y de operaciones* de la compañía hacen mención principalmente a la organización del acarreo (el plan de operación, la determinación del factor de carga y forma de pago a los conductores), a la asignación de terminales, al equilibrado de las cargas, a las políticas de descuento y a la estructura organizativa del tramo de ferrocarril (si se trata de líneas directas o son *hub&spoke*, la longitud de los trenes, etc.)
- Y como *factores tecnológicos* se puede hacer referencia a dos cuestiones. Una primera cuestión relativa tanto a la tecnología existente en el tramo de ferrocarril como al tipo de contenedores a usar (*piggyback*, *ISOcontainer*,...). Y una segunda cuestión referente a la aplicación de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones (TICs) en el TIM.

TABLA 4.1: Factores influyentes en el coste del TIM

Tipo de Factor	Factor	Observación	Nivel		
			Estratégico	Táctico	Operacional
Geométrico	O - D	La localización	♦	♦	♦
	Terminales		♦		
Mercancía	Volumen	Contenedor a usar		♦	♦
	Densidad			♦	♦
	Tipo			♦	♦
Organizativos y de operación de la compañía	Plan de Operación	<i>stay with o drop&amp;pick</i>	♦	♦	♦
	Forma de pago a conductores		♦	♦	
	Asignación de terminales a cargas			♦	♦
	Equilibrado de las cargar			♦	
	Estructura del trayecto principal	Lineal o <i>hub&amp;spoke</i>	♦		
	Longitud de trenes			♦	♦
Tecnológico	Tipo de Contenedor		♦	♦	♦
	TICs		♦		

En la Tabla 4.1 se muestra un resumen de los principales factores de los que dependen los costes del TIM según la clasificación anterior. La última columna de la tabla está relacionada con el alcance que pueden tener las decisiones sobre dicho factor.

### 4.2.2. El tiempo de tránsito

En muchos casos los usuarios de un determinado transporte dan mayor prioridad a los tiempos de servicio que al coste (McGinnis, 1990; Shinghal y Fowkes, 2002). Diferentes estudios han realizado estimaciones sobre la valoración que los usuarios realmente dan a este atributo (Wigan et al., 2000; De Jong et al., 1995; Fowkes et al., 1989).

Cuando se desea realizar un envío por carretera, el tiempo total que transcurre sería la suma del tiempo de carga en el origen, el tiempo de descarga en el destino y el tiempo de tránsito en camión. Este tiempo de tránsito estaría compuesto por los tiempos de conducción más los tiempos de parada. En estas paradas se considerarán los descansos obligatorios por ley, las pernoctas, los reportajes, etc. Siguiendo la notación de la Figura 4.2, el tiempo total del desplazamiento por carretera sería el mostrado en la ecuación (4.2).

$$t_{carretera} = t_A^{load} + t_{AB} + t_{AB}^{stop} + t_B^{unload} \quad (4.2)$$

En el caso del transporte intermodal, ecuación (4.3), el total del tiempo de tránsito sería la suma de los tiempos de carga y descarga más el tiempo de tránsito de la mercancía. Ahora este tiempo de tránsito de la mercancía está compuesto por los tiempos de acarreo, los tiempos de espera en terminales intermodales, los tiempos de transbordo entre modos y los tiempos de tránsito del trayecto principal.

$$t_{intermodal} = t_A^{load} + t_{AA'} + t_{A'}^{wait} + t_{A'}^{transshipment} + t_{A'B'} + t_{B'}^{transshipment} + t_{B'}^{wait} + t_{BB'} + t_B^{unload} \quad (4.3)$$

La propia estructura del TIM hace necesaria una serie de transbordos entre modos que tiene como consecuencia lógica, un aumento de los tiempos de viaje, y por tanto una disminución de la velocidad percibida del servicio. Este aumento del tiempo de viaje, será menos importante cuanto mayor sea el trayecto entre terminales, de manera que para trayectos muy largos este inconveniente pueda llegar a ser eclipsado. Sin embargo, para trayectos relativamente cortos los tiempos en las terminales aumentan porcentualmente el tiempo total del viaje, haciendo que la intermodalidad rara vez pueda competir en estos términos con el transporte por carretera. Hay que considerar también que la ecuación (4.3) muestra el caso de una cadena intermodal en la que participan dos modos diferentes, si se tratara de una cadena intermodal Carretera-Barco-Tren-Carretera, la complejidad y tiempos de espera y transbordo aumentarían. Lo mismo ocurriría en el caso de cadenas logísticas con diferentes transbordos entre *hubs*.

Para tratar de disminuir este inconveniente, dado el aumento de la complejidad logística, es necesaria una correcta planificación de toda la cadena intermodal, de modo que los tiempos de espera y transbordos entre modos sean minimizados. En algunas ocasiones es más importante una cadencia de entrega regular que el propio tiempo de entrega en sí, este hecho permite que a través de la adecuada planificación logística se puedan atraer nichos de mercancías que a priori parecían descartados (Kiesmuller et al., 2005).

#### 4.2.3. Flexibilidad y frecuencia de servicio

Al igual que el tiempo de servicio, otros atributos fundamental para muchos usuarios es la flexibilidad de operación y la frecuencia de servicio (Shinghal y Fowkes, 2002).

El transporte intermodal, si se analiza desde un punto de vista geográfico, presenta la misma flexibilidad de servicios que el transporte por carretera, ya que en los tramos finales hacen uso del transporte por carretera poder realizar un servicio puerta a puerta.

En el caso de analizar la frecuencia de servicio, en el transporte por carretera los envíos pueden ser llevados a cabo casi a cualquier hora; en la mayoría de los casos, una vez que la mercancía está lista esta puede salir directamente a su destino, dependiendo sólo de si la flota es propia o subcontratada o del convenio al que se llegue con la empresa transportista. En el caso del transporte intermodal, existen horarios prefijados en los tramos realizados o bien por barco o bien por tren, por lo que el usuario del transporte tiene que adaptar sus envíos al día y hora de salida de estos medios. El transporte intermodal, en este caso, incorpora las deficiencias del transporte marítimo o ferroviario.

Particularizando en el transporte intermodal tren-carretera, ni siquiera los clientes que disponen de servicios *ad-hoc*, normalmente grandes empresas que fletan trenes en su totalidad (como podría ser el caso de Mercadona), pueden hacer uso de ellos en cualquier momento, ya que estos clientes contratan unos envíos semanales a los cuales se tienen que adaptar, y estos servicios van ligados a unos surcos horarios.

#### 4.2.4. Puntualidad

La puntualidad es una de las más importantes variables a la hora de tomar una decisión respecto al modo de transporte (Bhat y Sardesai, 2006; Allen et al., 1985; Wigan et al., 2000; Beuthe et al., 2001), y es que los usuarios dan incluso mayor valor a la incertidumbre sobre el tiempo de tránsito esperado, que al propio tiempo medio esperado. De acuerdo con el estudio de mercado desarrollado por Hertenstein y Kaplan

(1991): “un 1 % de mejora en la fiabilidad del tiempo de entrega de mercancías podría alcanzar un incremento del 5 % de los beneficios del mercado”.

La actual congestión en las carreteras europeas podría parecer motivo suficiente para activar un flujo de usuarios del transporte por carretera al transporte intermodal, sin embargo muchas veces los usuarios han preferido alternativas como la conducción en horarios nocturnos antes que la alternativa intermodal (Van Schijndel y Dinwoodie, 2000)

Pare entender esta decisión es necesario conocer los mecanismos de generación de retrasos en la cadena intermodal. El cliente intermodal dispone de varias alternativas paralelas antes de pactar un servicio determinado, éste puede decidir la compañía con la que realizará el servicio y las terminales implicadas en los transbordos. Ahora bien, una vez realizada la contratación de un determinado servicio intermodal, los distintos eslabones de la cadena intermodal actúan en serie. Esto implica que dentro de la cadena intermodal existirán tres elementos fundamentales en la generación de retrasos: los trayectos por carretera, los transbordos, y el trayecto principal del transporte.

Mientras que en el transporte por carretera, un retraso puntual en una determinada vía puede ser compensado a lo largo del recorrido, en el caso del transporte intermodal, un retraso en el primer tramo por carretera podría ocasionar la pérdida del transporte destinado al trayecto principal y por tanto ocasionar un gran retraso. Este es el principal riesgo de retraso en este tipo de transporte, ya que en el *long-haul* los datos demuestran que no suelen existir demasiados desfases; esto es debido principalmente a las holguras temporales con las que trabajan este tipo de transportes, a la baja accidentalidad de los mismos, y en el caso particular del transporte ferroviario, a los niveles de puntualidad alcanzados.

Los retrasos en las terminales pueden estar ligados a esperas debidas a retrasos en otra parte de la cadena logística o a retrasos internos por una mala planificación de los recursos. Innumerables estudios de diferentes aspectos pueden ser encontrados en la literatura (Steenken et al., 2004; Stahlbock y Voß, 2008), tales como reglas de priorización de descargas en puertos, logística de almacenamiento de contenedores, etc.

#### 4.2.5. Seguridad

Se entenderá por seguridad la probabilidad que la mercancía llegue a su destino en las condiciones esperadas. Dos son los motivos principales para que este hecho no ocurra así, por un lado la probabilidad de pérdida y por otro la probabilidad de daño o rotura.

Si se considera la seguridad como probabilidad de pérdida de la mercancía, el transporte por carretera debe presentar una mejor valoración. Considerando que la

probabilidad de pérdida en el origen es la misma para cualquier modo de transporte, la intermodalidad presentará peores índices a lo largo del resto de la cadena de transportes. Este hecho es claramente demostrable al presentar la intermodalidad un mayor número de manipulaciones de la mercancía. Sin embargo, los índices de pérdida son prácticamente nulos tanto en la carretera como en el transporte intermodal.

Ahora bien, si la seguridad es considerada como la probabilidad de daño o rotura de la mercancía, varios aspectos han de ser tenidos en consideración. El incremento de las manipulaciones de la mercancía en el transporte intermodal podría incrementar la probabilidad de que la mercancía resultara dañada. Sin embargo, si son miradas las estadísticas sobre accidentalidad en los distintos modos de transporte ([European Commission, 2009](#)), la siniestralidad en el transporte ferroviario o en el transporte marítimo es considerablemente más baja que en el transporte por carretera. Es decir, a lo largo del trayecto el transporte intermodal presenta menor riesgo de daños en ese sentido.

Una cuestión muy importante se escapa de la mayoría de los estudios: la probabilidad que la mercancía sufra daños durante el transporte sin haber existido ningún incidente notable. Cuando se realizan estudios sobre la resistencia de las mercancías paletizadas, estos estudios suelen estar centrados en el transporte por carretera, y todas las pruebas que se realizan tienden a caracterizar los movimientos y golpes que sufre la mercancía en el remolque de un camión. Cuando la mercancía paletizada de forma idónea para el transporte por carretera es cargada en un tren, esta sufre una serie de impactos para los cuales no fue probada. Durante el transporte, la mercancía sufre principalmente tres tipos de movimientos; el lateral, provocado por la fuerza centrífuga al coger las curvas; el vertical, provocado por los efectos de la amortiguación; y el longitudinal, provocado principalmente por las aceleraciones y desaceleraciones del vehículo tractor. Los dos movimientos primeros pueden ser considerados similares tanto para el transporte ferroviario como para el transporte por carretera. Sin embargo, en el movimiento longitudinal el transporte ferroviario presenta una diferencia notable; el movimiento longitudinal sufrido por la mercancía en un vagón de tren es radicalmente más brusco que en transporte por carretera, debido a los choques existentes entre vagones, y por tanto, la mercancía transportada que no ha sido sometida a las pruebas oportunas podría sufrir daños.

### 4.3. Modelo matemático de elección modal

La cadena intermodal conecta un origen y un destino a través de una serie de enlaces. Entre estos enlaces existen una serie de nodos, algunos de los cuales son nodos de decisión. Decisiones tomadas en el sentido de elección del modo de transporte y actor implicado en el enlace en cuestión.

Todo lo expuesto con anterioridad se modelará considerando un grafo donde los

nodos representan distintos orígenes, destinos y/o estaciones intermodales,  $G = (N, A)$ . Un envío intermodal podrá ser efectuado entre un origen,  $o \in N$ , y un destino,  $d \in N$ , directamente o a través de distintas terminales intermodales (ver Figura 4.5).

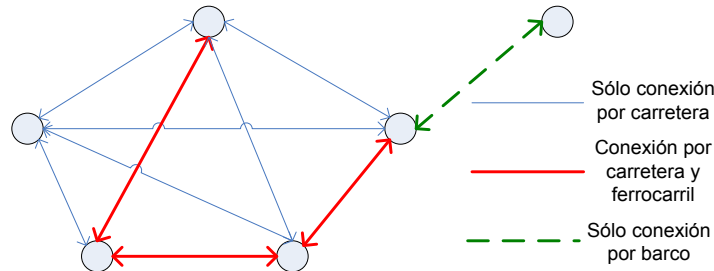


FIGURA 4.5: Modelo red intermodal

El objetivo del modelo, ecuación (4.4), es enviar un flujo de mercancía a coste mínimo. En cada trayecto, la mercancía puede ser mandada a través de diferentes modos de transportes,  $k \in K$ . Cada enlace tiene un coste fijo,  $f_{ijk}$ , y un coste variable dependiente del flujo de mercancías que se envíe,  $c_{ijk}$ . El coste de una determinada ruta será la suma de los costes fijos de los distintos enlaces que están operativos,  $y_{ijk}$ , más los costes variables de los enlaces por el flujo que los atraviesa,  $x_{ijk}$ . Estos costes pueden ser considerados costes generalizados y computar por tanto el coste del tiempo y de la puntualidad del servicio. Los distintos enlaces tendrán además una capacidad máxima de operación,  $Q_{ijk}$ .

$$FO : \min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} (f_{ijk} y_{ijk} + c_{ijk} x_{ijk}) \quad (4.4)$$

sueto a:

$$\sum_{m \in D(j)} \sum_{k \in K} x_{imk} - \sum_{n \in P(j)} \sum_{k \in K} x_{njk} = \begin{cases} \gamma & \text{si } j = o \\ 0 & \text{si } j \neq o, j \neq d \\ -\gamma & \text{si } j = d \end{cases} \quad \forall j \in N \quad (4.5)$$

$$x_{ijk} \leq Q_{ijk} \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (4.6)$$

$$x_{ijk} \leq M \cdot y_{ijk} \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (4.7)$$

$$y_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (4.8)$$

$$x_{ijk} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \quad (4.9)$$

El modelo está sujeto a una serie de restricciones. La ecuación (4.5) es una ecuación de continuidad donde  $D(j)$  son los descendientes del nodo  $j$  y  $P(j)$  son los antecesores de dicho nodo. En dicha ecuación se impone que todo lo que entra en un nodo salga de él, a menos que éste sea el origen o destino de la carga. La ecuación (4.6) se trata una restricción de capacidad, impidiendo que pase por un enlace más flujo que la capacidad del mismo. Esta capacidad permitirá modelar la existencia o no de

un determinado modo de transporte; la no existencia de un modo de transporte en un enlace se asimila a asignarle capacidad cero. En la ecuación (4.7)  $M$  es un número de valor muy elevado, obligando de esta manera a que si pasa flujo por el enlace  $(i, j)$  este esté abierto. Las restricciones (4.8) y (4.9) definen el tipo de variables del modelo.

Como en el caso del transporte intermodal también se incurre en gastos en los nodos, será necesario transformar los nodos en arcos a la hora de caracterizar la red (ver Figura 4.6). Cada nodo es desagregado en tantos nodos ficticios como enlaces tenga con el resto de nodos de la red, y entre cada par de nodos ficticios existirá un enlace que determinará el coste en el interior del nodo (terminal). De este modo, se puede caracterizar los distintos gastos de transbordo; en el caso de que no exista transbordo de algún tipo, el enlace entre el par de nodos ficticios tomará capacidad cero (ver enlace g de la Figura 4.6). Puede darse el caso que el modo de entrada y de salida del nodo sea exactamente idéntico, pero sí se realice transbordo; por ejemplo, el transbordo entre trenes (ver enlace c de la Figura 4.6).

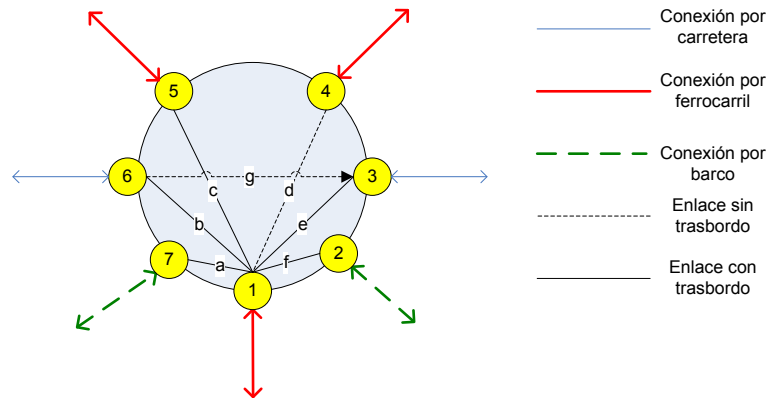


FIGURA 4.6: Modelo nodo desagregado

#### 4.4. Modelo de ayuda a la decisión en el transporte intermodal

Para facilitar la resolución del modelo anterior, se han desarrollado tres árboles de ayuda a la decisión, cuyo principal objetivo es presentar todas las posibles alternativas que existen a la hora de realizar el transporte intermodal. Los tres árboles implementados corresponden con los tres actores que pueden llegar a tomar decisiones en la construcción de la cadena intermodal:

- El cargador.
- El transitario.
- La empresa de transportes.

En cada árbol se muestran las diferentes opciones que se le pueden presentar al actor correspondiente. En el caso del cargador (ver Figura 4.7), este puede subcontratar las operaciones de transporte o llevarlas a cabo él mismo con sus propios medios. En el caso de subcontratarlo, el proceso depende de las conexiones por mar, tierra y aire existentes entre el origen y el destino. Para cada caso, el cargador necesita decidir entre las diferentes opciones de cada trayecto. Los modos de transporte considerados en el modelo son el ferrocarril, la carretera y el barco; el transporte aéreo será excluido debido a que tiene características totalmente diferentes en el transporte de mercancías, y a que rara vez se muestra competitivo con el resto de modos. Los operadores logísticos considerados serán: las empresas de transporte, el transitario, el operador ferroviario (Renfe u otros), y la naviera.

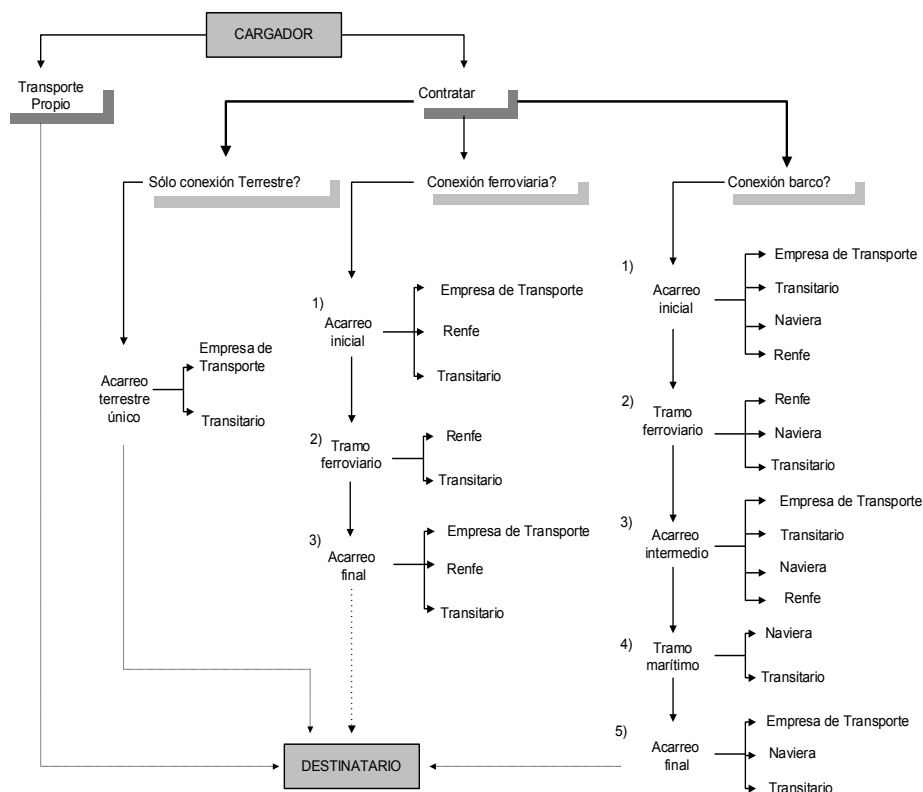


FIGURA 4.7: Árbol de ayuda a la decisión para un cargador de la cadena intermodal

Los árboles de ayuda a la decisión para el transitario y para las empresas de transportes se muestran respectivamente en las Figuras 4.8 y 4.9.



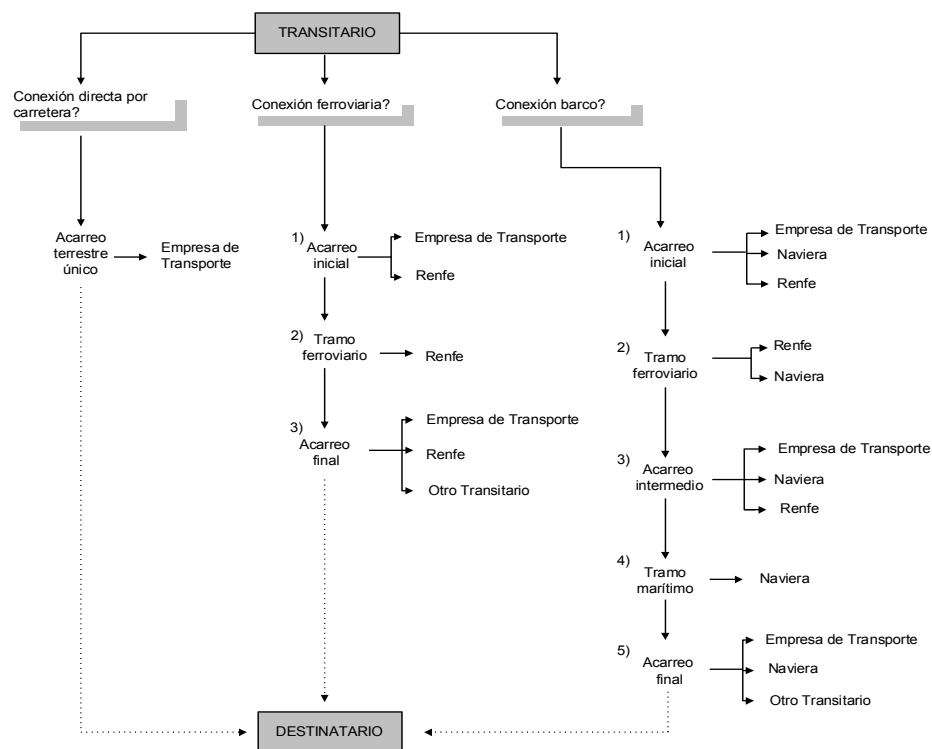


FIGURA 4.8: Árbol de ayuda a la decisión para un transitario de la cadena intermodal

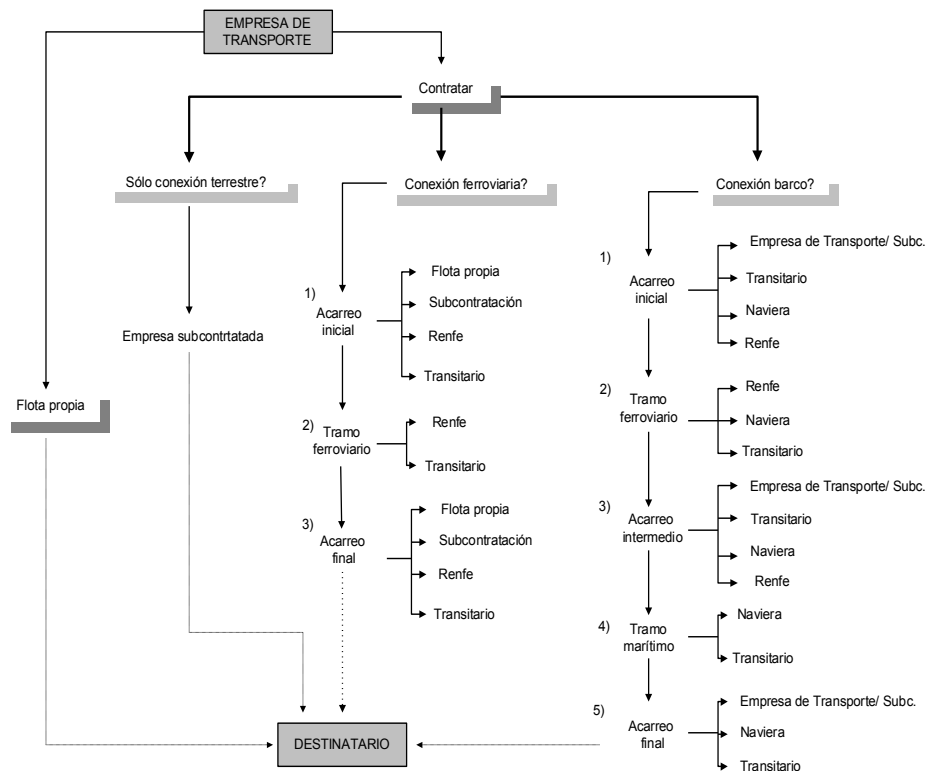


FIGURA 4.9: Árbol de ayuda a la decisión para una empresa de transportes de la cadena intermodal

#### 4.4.1. Aplicación al transporte intermodal de España

A modo de ejemplo, se aplicó el modelo de elección intermodal a un caso concreto: el análisis de rutas de transporte desde Sevilla al resto de España. Como hipótesis de partida se considerarán márgenes de ganancia de un 10 % para las empresas de transporte por carretera sobre el coste del observatorio, otro 10 % de ganancia para los transitarios, las tarifas de tren multicliente de Renfe (suponiendo contenedores de 40 pies) y una distancia media a la terminal ferroviaria de 60km. Los datos que se usaron pueden consultarse en [Escudero et al. \(2007\)](#).

Los resultados alcanzados se muestran en la Figura 4.10. Estos resultados confirman una distancia de ruptura cercana a la presentada por otros autores, fijándose en este caso entorno a los 500-600 km. El estudio permite además analizar un caso muy interesante, como es el transporte entre Sevilla y el Levante español, donde resulta más rentable el uso de transporte por carretera, a pesar de la distancia que los separa. Este hecho es debido a la inexistencia de servicios ferroviarios directos, siendo necesario el paso por Madrid, mientras que existen grandes autopistas por la costa.

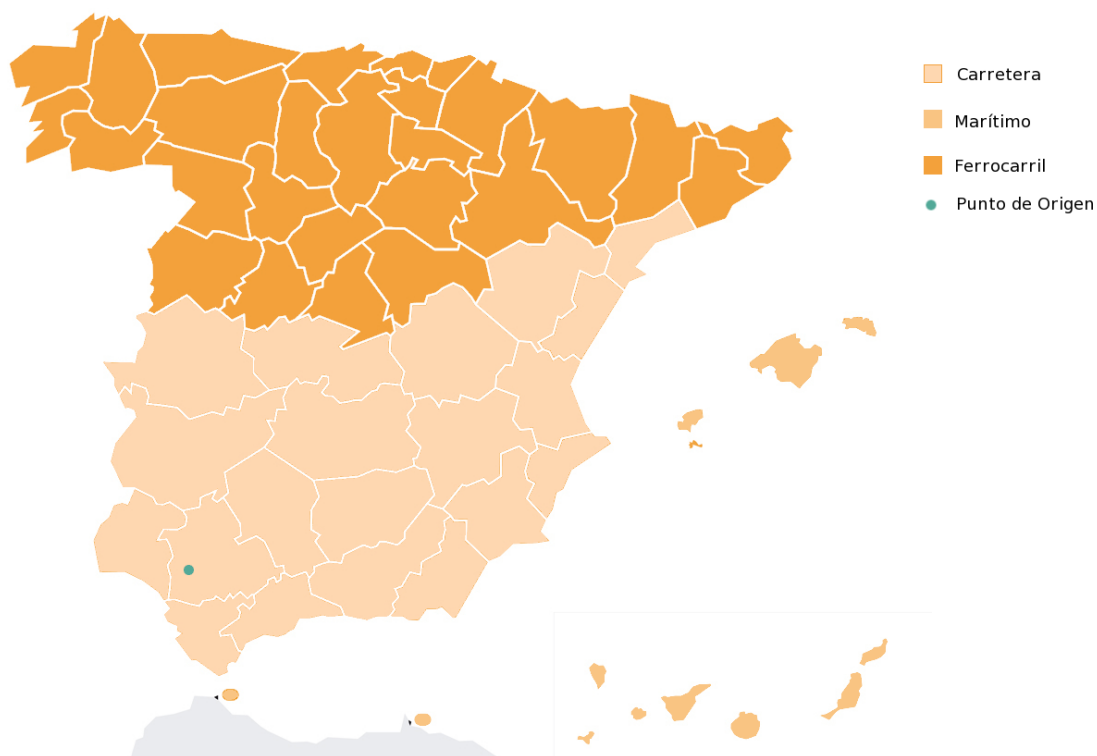


FIGURA 4.10: Mapa del mercado intermodal en España

## 4.5. Posibles líneas de mejoras en el transporte intermodal

Como se ha visto en los capítulos anteriores la intermodalidad presenta una serie de características que la hacen sumamente atractiva como alternativa al transporte por carretera desde la visión de las diferentes instituciones gubernamentales. Sin embargo, esta visión no es del todo percibida por los usuarios del transporte. Como se ha visto a lo largo de este capítulo, la intermodalidad presenta actualmente una serie de deficiencias para presentarse como competencia real del transporte por carretera; en muchas ocasiones estas deficiencias eclipsan otra serie de propiedades que resultarían atractivas para los usuarios.

Este epígrafe pretende ser un resumen de posibles líneas de mejora que han sido propuestas en la literatura existente para potenciar la intermodalidad como una realidad factible. No se pretende hacer un análisis exhaustivo de todas las referencias existentes, sino más bien marcar las posibles líneas y las soluciones que actualmente se están planteando. Estas líneas de mejora se dividirán en dos grandes grupos íntimamente interrelacionados: (a) mejoras que afectan a la cadena intermodal como conjunto y (b) posibles mejoras en cada uno de los eslabones de cadena intermodal.

### 4.5.1. Mejoras globales de la cadena intermodal

La intermodalidad en muchas ocasiones se ha mostrado como un conjunto de redes de transporte interconectadas físicamente, donde los cambios entre modos de transporte equivalen más a un cambio de sistema que a un mero transbordo técnico. A veces la intermodalidad no es más que el uso de una red detrás de otra, sin que exista un tráfico fluido dentro de la misma. Esto presenta un grave inconveniente, dado que en tal caso la intermodalidad captaría todas las deficiencias de gestión de cada una de las redes y añadiría los costes de fricción entre redes, en lugar de buscar la interoperatividad de las redes. La Unión Europea señala que esta visión desacoplada de la intermodalidad se traduce en:

- precios más elevados
- trayectos más largos, mayores retrasos y plazos menos fiables
- menor disponibilidad de servicios de calidad
- restricciones del tipo de mercancías
- un mayor riesgo de daños en la carga
- procedimientos administrativos más complicados

Se hace necesario gestionar el transporte intermodal como una cadena global (Panayides, 2002; Meixell y Gargeya, 2005); una cadena donde la información fluye en beneficio del transporte. Existen una serie de objetivos estratégicos que permitirían el adecuado desarrollo de la intermodalidad en el contexto de la política común de transportes, haciendo posible una reducción de los efectos anteriormente mencionados:

- una estrategia común en infraestructuras.
- un único mercado de transporte
- la identificación y eliminación de obstáculos, que eliminen costes de fricción entre modos
- la implementación de la sociedad de la información en el transporte intermodal

La consecución de estos objetivos vendría ligada al desarrollo de una serie de acciones puntuales, que de un modo u otro afectaría a cada uno de ellos. A continuación se comentarán alguna de dichas acciones.

Para poner en relieve la intermodalidad es necesario que la estrategia común de infraestructuras esté centrada en un diseño intermodal de la RTE-T. Para ello es conveniente estudiar qué configuraciones de la red son más adecuadas, como por ejemplo la configuración en Hub (Imai et al., 2006; Rotter, 2004; Groothedde et al., 2005); ver el lugar más conveniente donde colocar las terminales intermodales (Arnold et al., 2004; van Klink y van Den Berg, 1998); estudiar el equipamiento de las mismas (Ballis y Golias, 2004; Abacoumkin y Ballis, 2004; Kozan, 2006); y ver qué conexiones son necesarias para facilitar el acceso a las terminales intermodales, dado que a veces la falta de determinados tramos de infraestructuras suponen un aumento de los costes de transferencia entre modos.

Con acciones como las anteriores se resolverían problemas de conexión física de la red; el desarrollo de un mercado de transporte único requeriría además limar las conexiones funcionales de la red. Se hace necesario aumentar la interoperatividad entre modos e incluso entre fronteras (Mataix et al., 2006), eliminando las barreras existentes como los distintos sistemas de señalización ferroviaria. El diseño de los distintos parámetros de funcionalidad de cada una de las subredes que componen un transporte intermodal no se puede realizar aisladamente, es necesario un planteamiento global (Van Duin y van Ham, 1998; Southworth y Peterson, 2000; Trip y Bontekoning, 2002), es necesario por ejemplo que los horarios de los diferentes modos de transporte estén armonizados (Erera et al., 2005; Jula et al., 2006; Shintani et al., 2007; Choong et al., 2002). En este camino tiene un especial papel la búsqueda de alianzas, que pueden favorecer enormemente la percepción del transporte intermodal (Zhang et al., 2007); es importante señalar que las alianzas globales traen ligada una serie de medidas a tomar localmente, como puede ser el desarrollo de las terminales (McCalla, 1999). Además es

necesario implementar unos procedimientos administrativos que fomenten la competitividad del transporte intermodal, ahorrándose el usuario tramites en el proceso y donde quede claramente determinado la responsabilidad del transporte.

Incluso con las infraestructuras necesarias y con una mayor integración entre modos existen una serie de obstáculos que pueden ocasionar unos costes de fricción entre modos; considerándose dichos costes como costes adicionales debido a la dificultad de transferencias entre modos. Se hace necesario por tanto armonizar los estándares de transporte; un tema crucial hace referencia a las distintas unidades de carga.

Por último es necesario fomentar el flujo de información en tiempo real del transporte intermodal a todos los niveles ([Giannopoulos, 2004](#); [Bontekoning y Priemus, 2004](#)). La intermodalidad no puede permitirse adoptar la burocracia individualizada de cada uno de los modos que la componen; es necesario simplificar el flujo burocrático de información, estableciendo procedimientos normalizados ([Panayides, 2002](#)). Esto no sólo debe limitarse a la propia tramitación burocrática, una adecuada trazabilidad puede permitir optimizar la planificación de las operaciones, disminuyendo los costes de espera entre modos. Por tanto utilizar comunicaciones como los satélites ([Mintsis et al., 2004](#)) o la redes de telefonía móvil para el correcto seguimiento y localización de las cargas abre importantes puertas a un mayor rendimiento del transporte intermodal ([Fancello et al., 2011](#); [Zhao y Goodchild, 2011](#)).

#### 4.5.2. Mejora en cada etapa de la cadena intermodal

Como se ha comentado en el punto anterior la eficiencia de la cadena de transporte intermodal depende en gran medida globales de mejoras en el funcionamiento de las diferentes etapas como conjunto; es decir, en una mayor integración entre los diferentes modos. Sin embargo, este hecho no excluye que mejoras en cada una de las etapas del transporte intermodal puedan influir positivamente en la percepción de todo el transporte como conjunto, llegando a ser incluso determinantes.

Este trabajo no va a entrar en definir cada una de las mejoras en los diferentes etapas, dado que en la literatura se ha hablado ampliamente de ello; pero sí se van a referenciar algunos estudios que previamente han realizado dicho trabajo y se ejemplificarán algunos casos. Importantes revisiones bibliográficas al respecto pueden encontrarse en [Macharis y Bontekoning \(2004\)](#), [Bontekoning et al. \(2004\)](#) y [Caris et al. \(2008\)](#).

En el caso del acarreo terrestre una de las principales líneas de mejora es una gestión centralizada del mismo ([Morlok y Spasovic, 1995](#)), que aumentaría el factor de carga y por tanto permitiría disminuir los costes. El uso de tecnologías de la información y la comunicación abriría un abanico de posibilidades como: la detección automática de matrículas, para evitar retrasos en la entrada de las terminales; el seguimiento vía satélite

de la flota, para evitar retrasos inesperados y costes debido al almacenamiento extraordinarios en la terminal; la comunicación permanente entre la flota y los consignatarios, que permitiría la adición de tareas *on line*; etcétera.

En el trayecto principal nuevamente aparecen líneas de mejora como puede ser: el uso de trenes de mayor longitud (Janic, 2008), el diseño de mejores líneas que eviten excesivas paradas, la creación de nuevas infraestructuras, o la normalización de procedimientos ferroviarios.

Igualmente es especialmente determinante el diseño de las terminales de contenedores. Los estudios presentados por Stahlbock y Voß (2008) y Steenken et al. (2004) hacen una revisión de todos los aspectos a tener en cuenta dentro de las mismas, y realizan una revisión de los estudios existentes.

## 4.6. Resultados de interés para el desarrollo de la tesis

Este capítulo ha puesto de manifiesto una serie de estudios que permiten vislumbrar los motivos por los cuales la intermodalidad no está siendo una realidad todavía. A pesar de que por parte de la instituciones se señala a la intermodalidad como el modelo a seguir, sus ventajas no son del todo vistas para los posibles usuarios de la misma.

La principal fortaleza de la intermodalidad, según la percepción de los usuarios, es su economía de escala, la posibilidad de ahorrar en costes. Este ahorro sólo se produce a partir de una distancia llamada distancia de ruptura; ésta se ha estudiado para un ejemplo particular, el cual corrobora los estudios anteriormente realizados por otros autores.

Para que la intermodalidad tenga realmente éxito es necesario mejorar la percepción que los usuarios tienen de ella; esta mejora sólo puede ser realizada a partir de conocer sus posibles deficiencias, las cuales han sido mostradas a lo largo del capítulo. A partir de ellas, se han presentado a grandes rasgos una serie de líneas de mejoras que podrían plantearse dentro de la intermodalidad para hacer a este tipo de transporte más atractivo. Resumiendo, se necesitan tomar acciones que hagan que la intermodalidad baje en costes, especialmente a corta distancia, y que mejore su respuesta temporal; de este modo podría captar una mayor diversidad de productos.

De todos los líneas de acción, esta tesis va a centrarse en la gestión centralizada del acarreo terrestre, haciendo uso de nuevas tecnologías. El motivo por el cual se ha optado por optimizar el *drayage* parte de la situación económica actual. Muchas de las acciones propuestas requieren de grandes inversiones; sin embargo, el planteamiento que se desarrollará en los próximos capítulos requiere de una inversión mucho menor. Y a pesar de esta menor inversión su influencia puede ser percibida por todo el conjunto de la cadena intermodal. Unir una gestión centralizada del acarreo terrestre con el uso de

TICs puede provocar una mejora en los costes y una disminución de los retrasos en las rutas.





## Parte II

# Mejoras en el acarreo terrestre



## El problema del acarreo terrestre

El acarreo terrestre es el conjunto de movimientos pertenecientes al transporte intermodal, que usan como modo de transporte la carretera y son llevados a cabo dentro del *hinterland* de una terminal intermodal. Este es nombrado en la literatura de diferentes maneras: remolcado, *pick-up&delivery*, *pre-&end-haulage* y *drayage*; sin embargo siempre hace referencia a la misma cuestión. Se trata de uno de los eslabones fundamentales de la cadena de transporte intermodal, ya que lo dota de la flexibilidad necesaria para hacerlo atractivo de cara a los usuarios del sistema.

Como se ha comentado en varios capítulos anteriores, el acarreo terrestre acumula un gran porcentaje de los gastos generados en toda la cadena de transporte, siendo por tanto un foco de posibles mejoras. Una reducción en los costes imputados a estos tramos provocaría una disminución en los gastos de toda la cadena de transporte y supondría una mayor competitividad de la intermodalidad; además posibilitaría el uso de la misma en trayectos más cortos que los comentados en el Capítulo 4.

En este capítulo se va a realizar una descripción detallada del problema del acarreo terrestre y se realizará una minuciosa revisión bibliográfica de la cuestión. Además, se realizará una formulación matemática del problema, tanto en su versión determinista como en su versión con tiempo de tránsito estocástico.

### 5.1. Las operaciones de acarreo

El *drayage* o acarreo terrestre conlleva la realización de los trayectos inicial y final del transporte intermodal de mercancías. En una región determinada, abarca el movimiento de contenedores y *trailers*<sup>1</sup> entre los clientes, la terminal y el depósito. En ocasiones, los movimientos de acarreo pueden cubrir más de una terminal intermodal en

<sup>1</sup>En adelante sólo se mencionará el término contenedor como genérico de cualquier unidad de carga

el caso que estas se encuentren lo suficientemente cerca unas de otras. Del mismo modo los depósitos puede encontrarse relativamente cerca de la terminal intermodal o incluso dentro de la misma. Un resumen completo de todos los movimientos posibles dentro del acarreo intermodal es mostrado en la Figura 5.1.

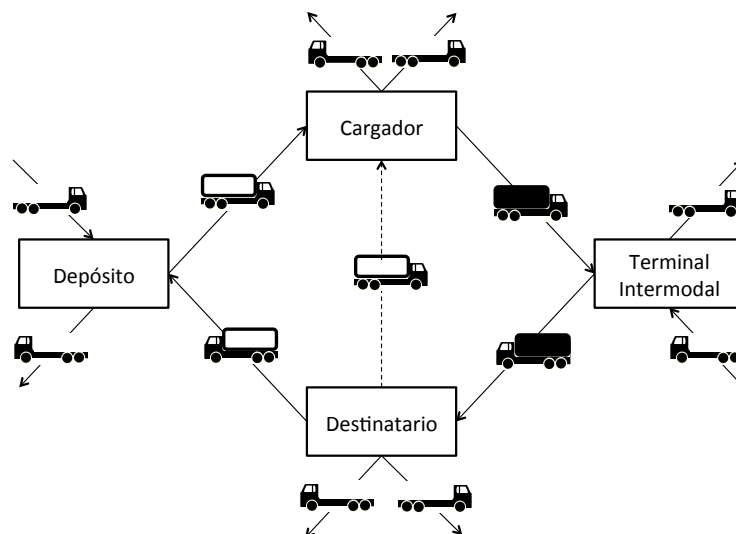


FIGURA 5.1: Diferentes movimientos en las operaciones de drayage

El movimiento de un contenedor conllevará la realización de una serie de operaciones. Las dos operaciones fundamentales son la recogida en el origen (*pick-up*),  $P$ , y entrega en el destino (*delivery*),  $D$ , de contenedores. Estas operaciones a su vez pueden referirse a contenedores llenos o vacíos, y están siempre enmarcadas dentro de una instalación (terminal, depósito, cliente, etc.) en particular.

Una petición de movimiento de un contenedor conllevará como mínimo la realización de dos operaciones consecutivas: una operación de recogida,  $P$ , y una operación de entrega,  $D$ . Al binomio  $PD$  se le llamará *tarea de acarreo*.

La esencia del transporte de mercancías es el movimiento de bienes, y por tanto, las tareas principales suelen suponer el movimiento de un contenedor cargado, o bien desde un cargador a la terminal o bien desde la terminal al destinatario.

Además de las tareas que conllevan el movimiento de contenedores cargados, como los mencionados anteriormente, existe otra serie de tareas que contempla el movimiento de contenedores vacíos. Si bien lo ideal sería reducir al máximo este tipo de tareas, para aumentar de este modo el factor de carga del transporte, el movimiento de contenedores vacíos parte de la necesidad de disponer de los recursos en el momento y sitio adecuado, ante situaciones de tráfico no equilibrado. Otro de los motivos para el movimiento de contenedores vacíos es la distinta propiedad de los mismos, que pueden pertenecer a cualquiera de los actores implicados en el transporte intermodal. Normalmente el propietario suele ser el cargador, el destinatario, o la empresa encargada de

realizar el tramo principal del transporte; dependiendo de quién sea, el tratamiento del contenedor vacío puede ser distinto.

En caso de que el contenedor vacío pertenezca al cargador, este posiblemente tenga que ser devueltos a la terminal, de modo que sean enviados a su lugar de procedencia o a donde su propietario haya considerado oportuno. De igual modo, puede que haya que recoger contenedores vacíos en la terminal, provenientes de otro lugar y que se encuentren en el proceso de retorno.

Los contenedores vacíos también pueden permanecer en la *hinterland* de la terminal a la espera de ser usados cuando sea necesario a través de su almacenamiento en depósitos e incluso pueden ser transferidos directamente entre distintos clientes, *bypass*, como muestra el movimiento señalado por la línea discontinua de la Figura 5.1. Este último caso supondría un ahorro en el desplazamiento en vacío del camión.

A las tareas de acarreo que conllevan el movimiento de un contenedor desde la terminal al destinatario, se les llamará *tareas de importación*. En el caso de movimientos entre el cargador y la terminal, se estará hablando de *tareas de exportación*.

Mientras que en las tareas de importación y exportación de contenedores el origen y destino de las tareas, lugares donde se llevarán a cabo las operaciones de *pick-up* y *delivery*, son conocidas inequívocamente; en el caso del movimiento de contenedores vacíos dentro de la misma *hinterland* existe cierta flexibilidad en la realización de los mismos. Si el cliente reclama un contenedor vacío para poder realizar el transporte de unos determinados bienes, puede que le sea indiferente la procedencia del mismo. Pudiendo este provenir o bien del depósito, o directamente de otro usuario que lo ha dejado vacío. Se estará hablando por tanto de *tareas bien definidas* o de *tareas flexibles*, respectivamente.

Las operaciones de recogida y entrega descritas anteriormente son operaciones de acarreo básicas, y por tanto dan lugar a tareas de acarreo básicas. La unión en la misma instalación de varias operaciones básicas puede dan lugar a operaciones más complejas, en las que dos operaciones han de realizarse consecutivamente. Estas operaciones suelen atender a situaciones en las que el cliente no dispone del contenedor necesario para realizar el envío y necesita que previamente se le suministre uno, o situaciones donde el cliente no tiene capacidad de almacenamiento de contenedores y una vez que ha recibido y descargado el mismo, necesita que lo retiren en la mayor brevedad posible. Esto puede resolverse de dos maneras diferentes: o bien el conductor permanece junto al contenedor durante toda la operación, *stay-with*<sup>2</sup> (*SW*), o bien el conductor deja el contenedor y se dedica a realizar otras operaciones mientras el cliente maneja el mismo, *drop&pick*<sup>3</sup> (*D&P*). En este último caso, una vez que el cliente finaliza la carga o descarga se ha de volver a recoger el contenedor, ya sea el mismo conductor u otro.

---

<sup>2</sup>También puede encontrarse en la literatura como *live*

<sup>3</sup>*Drop&hook* en el caso de *trailers*

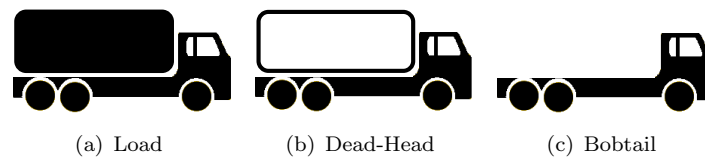


FIGURA 5.2: Cargas

La Tabla 5.1 contiene todas las posibles operaciones, tanto simples como complejas, que pueden llevarse a cabo en una localización determinada. Las dos últimas columnas muestran la situación de carga en la que se encuentra el camión antes de llegar y una vez que sale del lugar donde se realiza la misma. Los camiones puede encontrarse en tres estados de carga diferentes (ver Figura 5.2):

- *Load*: cuando el camión lleva un contenedor cargado o cuando la cabeza tractora y el trailer están unidas, y el trailer va cargado
- *Dead- Head*: cuando el camión lleva un contenedor vacío o cuando la cabeza tractora y el trailer están unidas, pero el trailer va descargado.
- *Bobtail*: cuando el camión no lleva contenedor alguno o cuando la cabeza tractora está desacoplada del trailer

Las tareas tanto básicas como complejas son la unión de varias de estas operaciones, en la cual el camión ha de empezar en estado *Bobtail* y terminal en el mismo estado. Las operaciones se pueden realizar consecutivamente siempre y cuando el estado en que termina una sea el mismo en el que empieza la siguiente.

TABLA 5.1: Resumen de las operaciones de acarreo

Tipo	Descripción	Estado del camión	
		Pre	Post
$D^l$	Entrega de contenedor lleno	<i>Load</i>	<i>Bobtail</i>
$P^l$	Recogida de contenedor lleno	<i>Bobtail</i>	<i>Load</i>
$D^e$	Entrega de contenedor vacío	<i>Dea-head</i>	<i>Bobtail</i>
$P^e$	Recogida de contenedor vacío	<i>Dead-head</i>	<i>Load</i>
$D^e \& P^l_{D\&P}$	Entrega vacío y recogida cargado	<i>Dead-head</i>	<i>Load</i>
$D^l \& P^e_{D\&P}$	Entrega lleno y recogido vacío	<i>Load</i>	<i>Dead-head</i>
$D^l \& P^l_{D\&P}$	Entrega lleno y recogido lleno	<i>Load</i>	<i>Load</i>
$D^e \& P^l_{SW}$	Entrega vacío y recogida cargado	<i>Dead-head</i>	<i>Load</i>
$D^l \& P^e_{SW}$	Entrega lleno y recogido vacío	<i>Load</i>	<i>Dead-head</i>
$D^l \& P^l_{SW}$	Entrega lleno y recogido lleno	<i>Load</i>	<i>Load</i>

Como se ha comentado anteriormente, las operaciones de acarreo son requerimientos de recogida o entregas de contenedores y la reubicación de contenedores vacíos

con el fin de poder facilitar la posterior carga de contenedores. En la mayoría de los casos, las empresas que contratan los servicios de acarreo, así como las propias terminales intermodales, necesitan que dichas tareas sean llevadas a cabo dentro de unos estrictos límites temporales.

En el caso de tareas de exportación, existe una limitación temporal referente a la hora programada de salida del tren o barco. Existirá una hora límite de llegada a la terminal, a partir de la cual el contenedor que se entregara tendría que esperar al siguiente barco o tren, lo cual podría tardar días o incluso semanas, con su correspondiente coste de almacenaje. En el caso de tareas de importación la restricción es justo la contraria. Existirá una hora antes de la cual no tiene sentido ir a la terminal debido a que el contenedor todavía no estará disponible.

Además de estas restricciones implícitamente ligadas a la llegada o partida del medio de transporte que realiza el trayecto principal del transporte intermodal, la terminal puede imponer otra serie de restricciones destinadas a mejorar el funcionamiento de la misma. Es usual que la terminal facilite una ventana temporal dentro de la cual no se incurrirá en costes extras. Si el contenedor es entregado en la terminal antes de dicha hora, en el caso de tareas de exportación, o retirado después de la misma, en el caso de tareas de importación, la terminal cargará unos costes en concepto de almacenamiento.

## 5.2. Revisión bibliográfica

En los últimos años, un gran número de referencias bibliográficas han surgido alrededor del transporte intermodal. Una idea de la creciente atención en dicho campo se puede encontrar en los trabajos presentados por [Macharis y Bontekoning \(2004\)](#) y por [Bontekoning et al. \(2004\)](#). Ambos trabajos analizan los estudios realizados en los últimos años clasificados según el horizonte de planificación: estratégico, táctico y operacional; y el agente que esté involucrado. [Macharis y Bontekoning \(2004\)](#) analiza las oportunidades de la investigación de operaciones en el desarrollo del transporte intermodal. [Bontekoning et al. \(2004\)](#) está centrado en el transporte *rail-truck*.

El acarreo terrestre, como eslabón fundamental del sistema de transportes intermodal, también ha visto incrementado el interés por parte de la comunidad científica. Este epígrafe presenta un exhaustivo estudio de los diferentes trabajos relacionados con el acarreo del transporte intermodal de mercancías. Primero, se verán estudios que han mostrado resultados de carácter estratégico o táctico, para luego mostrar los estudios centrados en un horizonte operacional. Dentro de este segundo grupo, se mostrarán tanto estudios que explícitamente versan sobre el acarreo terrestre como estudios que, si bien no tratan de forma directa el acarreo intermodal, pueden adaptarse al problema bajo estudio.

### 5.2.1. Enfoque estratégico-táctico

Los estudios que analizan el acarreo desde una perspectiva estratégico-táctica van destinados principalmente al análisis de los beneficios globales que tendría una gestión centralizada del acarreo. Además estudian la influencia que determinadas medidas, regulaciones o decisiones podrían tener sobre el conjunto del transporte, tanto en cuestión de costes como de calidad de servicio.

Morlok y Spasovic (1995) estudian detalladamente todos los factores que influyen en el coste de las operaciones de *drayage*, estableciendo una serie de estrategias para la reducción de los mismos. Estas estrategias, destinadas tanto al sector público como al sector privado, se basan principalmente en las siguientes líneas: una gestión centralizada, el uso de nuevas tecnologías, un correcto *marketing* y elección de precios, el aumento de la capacidad de las terminales y una mejora de sus conexiones, y un diseño adecuado de las políticas de uso del suelo.

En estudios previos, Morlok y Spasovic (1994) habían analizado el impacto de una planificación centralizada de las tareas de acarreo sobre la calidad de servicio y los costes. Desarrollan un modelo lineal entero para la optimización de las tareas de acarreo, y concluyen que una correcta planificación de los recursos puede disminuir el número de horas necesarias para la realización de las tareas, así como el total de kilómetros a recorrer, mejorando de esta forma los costes totales entre el 44 % y el 63 % dependiendo del plan de pagos de los conductores. Ayudándose del mismo modelo lineal, que proporciona costes marginales de las tareas de acarreo, proponen una serie de estrategias de precios para las operaciones de acarreo (Spasovic y Morlok, 1993).

Una correcta planificación de las tareas de acarreo tendría ligada, además de la ya comentada reducción de los costes, un aumento del *hinterland* de la terminal. Como señala Nierat (1997), un aumento en el factor de ocupación de los camiones o en el número de tareas diarias realizadas por conductor, provocaría el aumento del área de mercado de la intermodalidad.

Otro factor de gran importancia táctica en las operaciones de acarreo es la elección de la terminal. Fowkes et al. (1991) examinan la importancia que tiene la posición relativa del origen y el destino respecto a las terminales intermodales en la rentabilidad del transporte intermodal. Taylor et al. (2002) examina dos metodologías de elección de la terminal de transbordo de mercancías con el objetivo de aumentar la viabilidad y la eficacia del transporte intermodal.

Como ya señalaron Morlok y Spasovic (1995), determinadas regularizaciones pueden influir enormemente en los costes finales del acarreo terrestre. Un caso muy particular es estudiado por Cheung et al. (2008) que analizan la influencia de diferentes políticas reguladoras que históricamente ha impuesto el gobierno de Hong Kong en el acarreo con China. Por una parte se estudia la política *4up-4down* impuesta por



el gobierno, donde conductor, cabeza tractora, chasis y contenedor forman un todo indivisible que ha de realizar tanto el viaje de ida como el de vuelta, frente a políticas más flexibles como *2up-2down*, donde el conjunto indivisible es solamente la cabeza tractora y el conductor, o la política de total libertad. Por otra parte, estudia la exigencia gubernamental de asignación inequívoca entre conductor y cabezas tractoras, de forma que sólo un conductor puede hacer uso de un determinado coche, frente a la libertad de usos por parte de los conductores de cualquier vehículo de la flota. El estudio concluye que existen pérdidas de beneficios por la aplicación de tales restricciones y sugiere una relajación de las políticas.

### 5.2.2. Enfoque operativo

La literatura revisada con un enfoque a nivel operacional del acarreo terrestre se centra en resolver el problema del acarreo terrestre diario, *daily drayage problem* (DDP). Dicho problema tiene por objetivo minimizar los costes de todas las operaciones de acarreo que son llevadas a cabo por una empresa, o consorcio de empresas, en una región determinada a lo largo de una jornada laboral, teniendo en cuenta unos recursos limitados y una serie de restricciones a cumplir. Cuando una de las restricciones atiende a la realización de las tareas a desarrollar dentro de una ventana temporal, se estará hablando del *daily drayage problem with time windows* (DDPTW).

El DDPTW puede ser considerado un caso específico de clásico problema del rutado de vehículos con ventanas temporales, *vehicle routing problem with time windows* (VRPTW), donde la componente capacidad es de carácter binaria, o bien el vehículo se encuentra en carga, o bien el vehículo se encuentra en vacío; o bien lleva contenedor o bien no lo lleva. Parecería lógico, por tanto, resolver el DDPTW aplicando las mismas técnicas usadas para la resolución del VRPTW (Bodin et al., 1983; Solomon, 1987; Desrochers et al., 1992; Desrosiers et al., 1995); sin embargo, resultados experimentales demuestran que buenas metodologías de resolución para el VRPTW no tienen por qué ser las idóneas en casos particulares del mismo. Este hecho lo pone de manifiesto el estudio desarrollado por Dumas et al. (1995) que señala que: «*incluso aunque el TSPTW es un caso especial del VRPTW, el mejor método conocido de este último problema (Desrochers et al., 1992) no es el que mejores soluciones proporciona al TSPTW*». Esto ha propiciado que numerosas investigaciones hayan sido focalizadas en casos particulares del VRPTW, tales como el *pickup and delivery problem with time windows* (PDPTW) (Dumas et al., 1991; Nanry y Barnes, 2000; Landrieu et al., 2001; Lu y Dessouky, 2006; Bent y Hentenryck, 2006; Gronalt et al., 2003; Currie y Salhi, 2003, 2004; Imai et al., 2007) o el *traveling salesman problem with time windows* (TSPTW) (Wang y Regan, 2002; Dumas et al., 1995; Focacci et al., 2002; Gendreau et al., 1998; Calvo, 2000). Dichos problemas siguen siendo problemas de complejidad NP-Hard (Savelsbergh y Sol, 1995) a pesar de tratarse de casos particulares.

Diferentes metodologías de resolución han sido aplicadas a dichos problemas (TSPTW y PDPTW), pudiendo encontrarse en la literatura técnicas exactas (Dumas et al., 1991, 1995; Currie y Salhi, 2003), heurísticas (Gendreau et al., 1998; Calvo, 2000; Currie y Salhi, 2003; Imai et al., 2007) y metaheurísticas (Currie y Salhi, 2004).

Dado que el DDPTW puede ser formulado en términos de un TSPTW o un PDPTW, las conclusiones alcanzadas anteriormente son de enorme importancia. Exactamente, el DDPTW puede ser formulado o bien como un *asymmetric multi-traveling salesman problem with time windows* (am-TSPTW) (De Meulemeester et al., 1997; Bodin et al., 2000; Jula et al., 2005; Smilowitz, 2006; Francis et al., 2007; Zhang et al., 2009)<sup>4</sup>, o bien como un *full-load pickup and delivery problem with time windows* (FLPDPTW) (Gronalt et al., 2003; Currie y Salhi, 2003, 2004; Imai et al., 2007; Caris y Janssens, 2009). En el am-TSPTW las tareas serían representadas a través de los nodos del grafo, luego sería una formulación basada en nodos. En el caso del FLPDPTW, las tareas serían representadas por arcos de carga 1, teniendo el resto de arcos carga 0, por lo que se trataría de una resolución basada en arcos. Jula et al. (2005) y Wang y Regan (2002) muestran que el FTPDPTW puede ser transformado en un am-TSPTW.

Muchos de los estudios se identifican con el movimiento de contenedores dentro de una terminal donde el origen y el destino de las tareas a realizar son perfectamente conocidos. Gronalt et al. (2003) desarrollan cuatro heurísticas basadas en el ahorro para resolver el FTPDPTW. El mismo problema pero en el entorno de una terminal es resuelto por Imai et al. (2007) a través de una heurística basada en una relajación lagrangiana. Caris y Janssens (2009) modelan el problema FTPDPTW y utilizan una metodología con dos fases: primero una heurística de inserción es propuesta para encontrar una solución inicial, la cual es mejorada a través de una búsqueda local con tres vecindades. Sólo consideran tareas desde y hacia la terminal. En un trabajo posterior (Caris y Janssens, 2010) se propone un algoritmo de recocido determinista. Jula et al. (2005) modela el problema del movimiento de contenedores con ventanas temporales en origen y destino como un am-TSPTW, comparando tres metodologías para resolver el mismo: (a) un método exacto en dos fases basado en la programación dinámica, (b) una metodología híbrida que conjuga programación dinámica y un algoritmo genético, y (c) una heurística de inserción. Namboothiri y Erera (2008) estudian la influencia de introducir un punto de control en el acceso de las terminales sobre la eficiencia en las operaciones de acarreo.

Especial atención es prestada por algunos trabajos a la importancia de la relocalización de los contenedores vacíos. Smilowitz (2006) modela el problema como un am-TSPTW con tareas flexibles, donde las tareas flexibles son usadas para modelar los viajes en vacío. Para limitar el número de posibles realizaciones de las tareas flexibles, define una región geográfica de posibles ejecuciones, basado en una distancia fija al nodo. El objetivo es encontrar las rutas que minimicen el tiempo de tránsito y el número de vehículos, resolviéndose de forma conjunta la definición de los movimientos en vacío y

<sup>4</sup>De Meulemeester et al. (1997) y Bodin et al. (2000) no presentan ventanas temporales

el rutado de los vehículos. Resuelven el modelo haciendo uso de una heurística *Branch and Bound* usando *generación de columnas* en cada nodo. El estudio es mejorado en Francis et al. (2007) al considerar variable la región geográfica de posibles ejecuciones de las tareas flexibles. La región se fija atendiendo a la densidad de posibles ejecuciones dentro de la misma y no mediante un tamaño umbral previamente definido. Otro método basado en *generación de columnas* embebido en un *Branch and Bound* es propuesto por Ileri et al. (2006). Consideran diferentes tipos de conductores, pudiendo los mismos partir desde diferentes lugares. Las tareas de acarreo descritas son de mayor complejidad, pudiendo estar formadas por varias operaciones de acarreo. Braekers et al. (2012) continua en esa línea de investigación de Caris y Janssens (2010) considerando también el movimiento de contenedores vacíos, proponiendo dos metodologías: una secuencial y otra integrada. Zhang et al. (2009) formulan el am-TSPTW con múltiples depósitos y una sola terminal donde una búsqueda tabú reactiva es propuesta como metodología. Este problema es ampliado a múltiples terminales en Zhang et al. (2010) y solucionado a través de una metodología basada en la partición de ventanas (*windows-partition based method*, WPB) inspirada en Wang y Regan (2002). Zhang et al. (2011b) analizan el problema de un simple depósito y una sola terminal pero con limitación de contenedores vacíos en el depósito, una búsqueda tabú reactiva vuelve a ser usada.

Las variantes estáticas del DDP han sido definidas en Erera y Smilowitz (2008), pero las versiones estocásticas del problema están empezando a tener un interés creciente. Cheung y Hang (2003) realizan una formulación del problema con incertidumbre en el tiempo de servicio de las tareas, e implementan un procedimiento basado en ventanas deslizantes es implementado. Máhr et al. (2010) realizan una comparativa de un método *on-line* y otro basado en agentes para solucionar el DDPTW con incertidumbre. Dos tipos de incertidumbres son analizadas, incertidumbre en el tiempo de servicio y incertidumbre en el tiempo de llegada. Zhang et al. (2011a) señalan que sólo un porcentaje de las tareas a realizar en un día son conocidas al principio de la jornada, de modo que desarrollan una metodología dinámica de asignación de tareas. Escudero et al. (2011) añade incertidumbre en el tiempo de tránsito, resolviendo el problema a través de una metodología de re-optimización dinámica, en la que la localización de los vehículos es conocida en todo momento. Escudero et al. (2013) mejoran el trabajo previo a través de un estudio más profundo de los instantes en los cuales han de lanzarse las reoptimizaciones y de la priorización de determinadas tareas, las tareas que sólo pueden ser realizadas por un vehículo son declaradas prioritarias.

Analizando los diferentes métodos de resolución mencionados, es importante señalar que las técnicas exactas sólo son adecuadas para pequeñas instancias, dado que para instancias de mayor tamaño su tiempo computacional las haría inviables (Jula et al., 2005).

### 5.3. Descripción del problema: *Daily Drayage Problem with Time Windows*

Como ya se adelantó en el epígrafe anterior, los problemas DDP y DDPTW pueden ser formulados en términos de un am-TSPTW (*asymmetric multi-vehicle traveling salesman problem with time windows*). El problema tendría como objetivo optimizar las rutas de las tareas de acarreo llevadas a cabo dentro del *hinterland* de una terminal intermodal. El problema consistiría en asignar tareas,  $i \in \mathcal{T}$ , a vehículos,  $v \in \mathcal{V}$ , de modo que se minimicen los costes de servir todas ellas.

Los costes incluirán tanto costes fijos, por vehículo usado, como costes variables, por trayecto. Dichos costes fijos incluyen, por ejemplo, la depreciación de los vehículos, el sueldo de los conductores, el coste de alquiler en caso de que fuese necesario, etc. Los costes variables serán la suma de costes debidos a la distancia recorrida, los cuales incluirán costes de combustible, costes de mantenimiento prorrateado por kilómetro, etc. Existirán también otro tipo de costes, los costes de penalización, que serán debidos al incumplimiento de alguna de las restricciones del problema, lo cual podría provocar el pago de algún tipo de indemnización.

Una serie de simplificaciones han sido asumidas con el objetivo de facilitar la formulación del problema:

- Los vehículos son similares en cuanto a características y capacidades, y los contenedores son homogéneos en tamaño y tipo. En el caso de eliminación de esta simplificación la formulación debería adaptarse a un a-VRPTW, donde dependiendo de la capacidad del vehículo y del tamaño del contenedor se irían completando las rutas.
- Los costes fijos de todos los vehículos son iguales y los costes variables son proporcionales al tiempo en ruta o a la distancia recorrida. En el caso que la estructura de costes de los vehículos no fuera homogénea, habría que analizar la conveniencia de usar un vehículo u otro, e ir introduciéndolos en las rutas de menor a mayor coste. Costes proporcionales a la distancia recorrida es una simplificación comúnmente aceptada en la bibliografía.
- Existirá un sólo depósito, el cual se encuentra dentro de las mismas instalaciones que la terminal; esto es comúnmente aceptable debido a que este, si bien no está exactamente en la misma localización que la terminal, suele estar cerca por una cuestión de eficiencia.
- Sólo se realizarán tareas de importación y exportación<sup>5</sup>; lo cual limita el movimiento de contenedores a movimientos entre clientes y terminal, excluyendo de

---

<sup>5</sup>Aunque esta tesis no entrará en la optimización de la reposición de contenedores vacíos, su formulación puede verse en el epígrafe 5.3.3

este modo las operaciones de *bypass*. Sólo se consideran tareas simples, sin embargo, como las tareas compuestas no dejan de ser una composición de tareas simples no se perderá generalidad.

Clásicamente, el DDPTW se ha resuelto con una simplificación más: *entornos deterministas*. Esta simplificación permitía resolver el problema desde una perspectiva *estática* dado que se conoce a priori y con total certeza todas las variables del problema, entre ellas la velocidad de circulación de cada vehículo por cada vía. De este modo, se resuelve la asignación tarea-vehículo una sola vez, implementándose las rutas según las previsiones existentes al principio de la jornada.

Sin embargo, la realidad se aleja en la mayoría de las ocasiones de dicha simplificación, y la hipótesis de tiempos de tránsito conocidos con exactitud se desvanece ante cualquier imprevisto como un atasco, congestión de la vía, avería, etc.

Este trabajo elimina dicha simplificación, asumiendo tiempos de tránsito *estocásticos*. Se plantea la hipótesis de que soluciones clásicas del problema, encontradas bajo un prisma *estático-determinista*, pueden alejarse de la solución óptima real. De este modo, una vez asumido que el entorno en el que se lleva a cabo el transporte es estocástico, y por tanto, los tiempos de tránsito no son valores conocidos exactamente a priori, se busca la mejor metodología para la resolución del problema en entornos reales.

La formulación que se lleva a cabo en este epígrafe va destinada a poder resolver el problema desde cuatro posibles enfoques de resolución, los cuales se caracterizan por las consideraciones en el tiempo de tránsito y el instante de optimización de las tareas:

- Enfoque estático-determinista: el problema es resuelto una sola vez, y se considera como tiempo de tránsito el tiempo medio esperado. Se trata de la forma clásica de resolver el problema, mencionada con anterioridad. Se resolverá para poder tener un patrón de comparación.
- Enfoque dinámico-determinista: se tomará como tiempo de viaje el tiempo medio esperado, pero se realizarán re-optimizaciones a lo largo del día de modo que puedan corregirse en tiempo real posibles desajustes con la realidad.
- Enfoque estático-estocástico: se considerará una sola optimización pero introduciendo los valores probabilísticos de los tiempos de tránsito.
- Enfoque dinámico-estocástico: suma de las dos anteriores, donde se añade toda la información posible y además se permiten re-optimizaciones.

### 5.3.1. Formulación del problema con tiempo de tránsito determinista

El DDPTW determinista es definido sobre un grafo,  $G = (\mathcal{T}, A)$ , donde  $\mathcal{T}$  representa al conjunto de tareas y  $A$  representa los arcos entre tareas.

Sea  $i \in \mathcal{T}$  una tarea. Ésta abarcará la recogida del contenedor en el origen de la tarea,  $O_i$ , y su entrega en el destino,  $D_i$ . La distancia euclídea entre origen y destino proporcionará la distancia recorrida durante la realización de la tarea,  $d_i$ , y el tiempo esperado de desplazamiento,  $\bar{t}_i$ . Los tiempos de servicio en origen y destino,  $s_i^O$  y  $s_i^D$ , son conocidos y representarán los tiempos de carga y descarga del contenedor. Las tareas serán clasificadas en tareas de importación de contenedores,  $\mathcal{T}^I$ , y en tareas de exportación de contenedores,  $\mathcal{T}^E$ . Las tareas de importación conllevan la recogida de un contenedor de la terminal y entrega en un cliente final, por tanto el origen de la tarea es la terminal y el destino es el cliente. Sin embargo, en las tareas de exportación el origen se encuentra en el cliente y el destino es la terminal. En la formulación sólo han sido consideradas tareas bien definidas.

Las tareas estarán caracterizadas por unas ventanas temporales en origen y destino. Estas ventanas reflejan los tiempos entre los cuales debe comenzarse a realizar la carga del contenedor en el origen,  $[E_i^O, L_i^O]$ , y los tiempos entre los que debe empezarse a descargarse la carga en el destino,  $[E_i^D, L_i^D]$ . Aunque los tiempos en los cuales se puede llevar a cabo la realización de una determinada tarea pueden venir definidos tanto por el cliente como por la terminal, en el caso de tiempos de tránsito determinista no es necesario tener definidas ambas ventanas temporales, de inicio y fin de la tarea; según el procedimiento llevado a cabo por [Jula et al. \(2005\)](#) se pueden redefinir las restricciones de ambas ventanas en una sola,  $[E_i, L_i]$ .

Por conveniencia, se definirán las ventanas en la terminal, dado que es el elemento más restrictivo de la cadena. Por tanto, en el caso de tareas de importación,  $\mathcal{T}^I$ , la ventana temporal estará definida en el origen,  $[E_i^O, L_i^O]$ , y en el caso de tareas de exportación,  $\mathcal{T}^E$ , la ventana temporal estará definida en el destino,  $[E_i^D, L_i^D]$ .

Ante el incumplimiento de estas ventanas temporales se considerará una relajación de las mismas en las situaciones de entrega o recogida tardía de contenedores en la terminal; aunque, eso sí, se imputarán unos costes de penalización. En el caso de recogida tardía, se tendrá que pagar un coste por hora debido al tiempo extra que el contenedor ha permanecido en la terminal,  $c_{wait}$ . En el caso de un retraso en la entrega del contenedor en la terminal la situación se agrava, dado que el modo de transporte que realizará el trayecto principal de la cadena intermodal podría haber efectuado su salida, incurriéndose en unos costes de penalización por pérdidas del servicio,  $c_{miss}$ . De hecho, en este último caso, el contenedor previsiblemente permanecería en la playa o almacenes de la terminal hasta la llegada de un nuevo servicio que pudiera llevarlo a la terminal de destino. La Figura 5.3 muestra la forma de las ventanas resultantes.

La jornada laboral también estará marcada por una ventana temporal, de modo que todos los vehículos deberán volver al depósito antes del final de la jornada. Por simplicidad, y como se comentó con anterioridad, se considerarán al depósito y a la terminal en la misma localización.

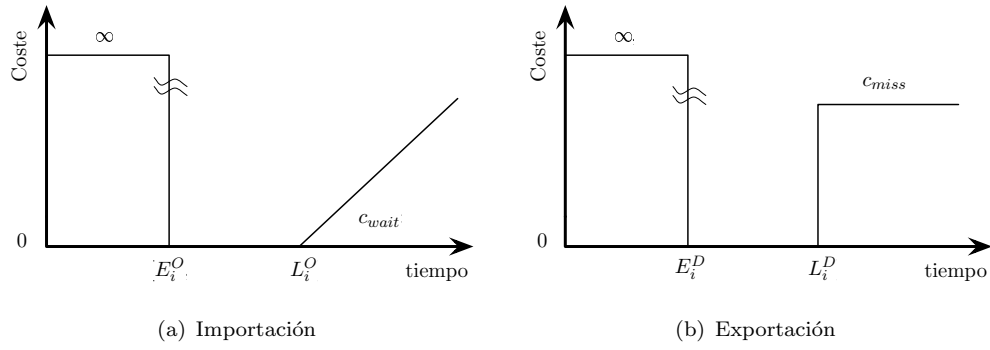


FIGURA 5.3: Ventanas temporales de las tareas

La duración de la jornada temporal de cada vehículo, su posición al comienzo del día y destino final, así como los horarios de apertura de la terminal intermodal serán modelados como tareas ficticias. De este modo, dos tareas ficticias serán creadas para cada vehículo, una de inicio de la jornada y otra de finalización de la misma,  $\mathcal{T}_f^{ini}$  y  $\mathcal{T}_f^{end}$ . En el caso estático y sin pérdida de generalidad, el origen y destino de todas estas tareas ficticias será la terminal, por lo que el tiempo de tránsito, la distancia recorrida y, de igual modo, el tiempo de servicio serán iguales a cero. Las ventanas temporales de estas tareas reflejarán las limitaciones temporales de la terminal y de los vehículos. En el caso de incumplimiento en la llegada a terminal se penalizará con un coste por unidad de tiempo,  $c_{depot}$

La inclusión de estas tareas ficticias, si bien no supone un beneficio aparente en el caso de una formulación estática, es fundamental para facilitar la formulación y codificación en el caso dinámico. Aunque se explicará con mayor detalle en el Capítulo 6, se puede ya adelantar que estas tareas permiten reflejar las diferentes situaciones en las que puede encontrarse cada vehículo de la flota.

Resumiendo, el conjunto de tareas  $\mathcal{T}$  estará formado por dos grandes subconjuntos, las tareas reales,  $\mathcal{T}_r$ , que englobarán el conjunto de ordenes de acarreo a realizar en una jornada, y las tareas ficticias,  $\mathcal{T}_f$ , que han sido creadas de un modo artificial para crear las limitaciones temporales de la terminal y los vehículos.

$$\mathcal{T} = \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f$$

$$\mathcal{T}_r = \mathcal{T}^{\mathcal{I}} \cup \mathcal{T}^{\mathcal{E}}$$

$$\mathcal{T}_f = \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_f^{end}$$

$$\mathcal{T}^{\mathcal{I}} \cap \mathcal{T}^{\mathcal{E}} = \emptyset$$

El conjunto  $A$  es definido como el conjunto de arcos que unen a los nodos  $\mathcal{T}$  del grafo  $G = (\mathcal{T}, A)$ . Dado que el conjunto de nodos representa las tareas a realizar en

un horizonte temporal dado y no una posición fija en el espacio, el arco  $(i, j) \in A$  es un arco que une el destino de la tarea  $i \in \mathcal{T}$  con el origen de la tarea  $j \in \mathcal{T}$ , el cual es en principio diferente al arco  $(j, i)$ ; por lo tanto, el conjunto de arcos  $A$  es asimétrico. Cada arco  $(i, j) \in A$  estará caracterizado por un tiempo de tránsito  $\overline{t_{ij}}$  y una distancia  $d_{ij}$ .

Como se ha ido indicando a lo largo del epígrafe, los costes asociados a una determinada solución serán:

- $c_v$ : coste fijo por vehículo incluido para penalizar el uso de vehículos adicionales.
- $c_{km}$ : coste por unidad de distancia recorrida en vacío.
- $c_{miss}$ : coste fijo de penalización por pérdida del trayecto principal.
- $c_{wait}$ : coste por unidad de tiempo debido a situaciones de espera en la terminal.
- $c_{depot}$ : coste por unidad de tiempo debido a retrasos en el retorno al depósito.

La variables de decisión consideradas en la formulación son:

- $x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la tarea } i \text{ y la tarea } j \text{ son servidos consecutivamente,} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases}$
- $nv_i = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } i \text{ es usado}^6 \text{ por primera vez,} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases}$
- $l_i^O = \begin{cases} 1 & \text{si existen retrasos al servir la tarea } i \text{ en el origen,} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases}$
- $l_j^D = \begin{cases} 1 & \text{si existen retrasos al servir la tarea } j \text{ en el destino,} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases}$
- $l_i^{depot} = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo representado por la tarea } i \text{ llega con retraso al depósito,} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso.} \end{cases}$
- $st_i^O$ : instante de comienzo de la carga del contenedor en el origen de la tarea  $i$ .
- $st_i^D$ : instante de comienzo de la descarga del contenedor en el destino de  $i$ .

Atendiendo a todas las variables y parámetros expuestos anteriormente, las siguientes líneas detallan la formulación del problema. La función objetivo minimiza el coste total de servir todas las tareas llevadas a cabo en una jornada laboral (ver ecuación 5.1). Las restricciones (5.2) y (5.3) garantizan que cada tarea es realizada una sola vez. La restricción (5.4) asegura la conservación del flujo. Las limitaciones en las ventanas

---

<sup>6</sup>En el caso de una formulación puramente estática todos los vehículos se consideran usados por primera vez



temporales es llevada a cabo a través de las restricciones (5.5) y (5.6). La consistencia de las variables temporales  $st_i^O$  y  $st_i^D$  es forzada por las restricciones (5.7) y (5.8). La expresión (5.9) indica que vehículos son usados por primera vez,  $uv_i$  es un dato del problema que indica si el vehículo ya había sido usado. Las expresiones (5.10), (5.11), y (5.12) señalan qué tareas son servidas con retraso, siendo  $M$  un número de elevado valor. Finalmente, (5.13)-(5.19) definen el rango de las variables del problema.

$$OF : \min \left( \sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r} \sum_{j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}} d_{ij} x_{ij} + c_v \sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini}} nv_i + c_{wait} \sum_{i \in \mathcal{T}_r^P} (st_i - L_i^O) l_i^O + c_{miss} \sum_{j \in \mathcal{T}_r^D} l_j^D + c_{depot} \sum_{i \in \mathcal{T}_f^{end}} (st_i - L_i^O) l_i^{depot} \right) \quad (5.1)$$

sujeto a:

$$\sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}, \quad (5.2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini}, \quad (5.3)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r} x_{ij} - \sum_{i \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}} x_{ji} = 0 \quad \forall j \in \mathcal{T}_r, \quad (5.4)$$

$$st_i^O \geq E_i^O \quad \forall i \in \mathcal{T}, \quad (5.5)$$

$$st_i^D \geq E_i^D \quad \forall i \in \mathcal{T}, \quad (5.6)$$

$$st_i^D \geq st_i^O + s_i^O + \bar{t}_i \quad \forall i \in \mathcal{T}, \quad (5.7)$$

$$x_{ij}(st_i^D + s_i^D + \bar{t}_{ij} - st_j^O) \leq 0 \quad \forall i, j \in \mathcal{T}, \quad (5.8)$$

$$\left( \sum_{j \in \mathcal{T}_r} x_{ij} \right) - uv_i \leq nv_i \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini}, \quad (5.9)$$

$$st_i^O - L_i^O \leq M \cdot l_i^O \quad \forall i \in \mathcal{T}^I, \quad (5.10)$$

$$st_j^D - L_j^D \leq M \cdot l_j^D \quad \forall j \in \mathcal{T}^E, \quad (5.11)$$

$$st_i^O - L_i^O \leq M \cdot l_i^{depot} \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{end}, \quad (5.12)$$

$$st_i^O \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{T}, \quad (5.13)$$

$$st_i^D \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{T}, \quad (5.14)$$

$$x_{ij} \in 0, 1 \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}^I, j \in \mathcal{T}^E \cup \mathcal{T}_f^{end}, \quad (5.15)$$

$$nv_i \in 0, 1 \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini}, \quad (5.16)$$

$$l_i^O \in 0, 1 \quad \forall i \in \mathcal{T}^I, \quad (5.17)$$

$$l_j^D \in 0, 1 \quad \forall j \in \mathcal{T}^E, \quad (5.18)$$

$$l_i^{depot} \in 0, 1 \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{end}, \quad (5.19)$$

Existen otras variables del problema que, si bien no son necesarias para la formulación dado que son derivadas de las anteriores, pueden facilitar la notación de las heurísticas que se plantearán en el Capítulo 7. Se trata de:

- $at_i^O$ : instante de llegada del contenedor al origen de la tarea  $i$ .
- $at_i^D$ : instante de llegada del contenedor al destino de la tarea  $i$ .

Estas variables están ligadas con las anteriores a través de las ecuaciones (5.20) y (5.21), siendo  $i'$  la tarea que precede a la tarea  $i$ .

$$at_i^O = st_{i'}^D + s_{i'}^D + \overline{t_{i'i}} \quad (5.20)$$

$$at_i^D = st_i^O + s_i^O + \overline{t_i} \quad (5.21)$$

### 5.3.2. Formulación del problema con tiempo de tránsito estocástico

Cuando el tiempo de tránsito es una variable estocástica, es necesario llevar a cabo algunas transformaciones en la formulación del problema.

Lo primero es considerar el tiempo de tránsito como una variable aleatoria que sigue una determinada función de distribución. Por tanto, el tiempo de tránsito entre las tareas  $(i, j)$  será representado a través de la variable aleatoria  $t_{ij}$ , cuya media  $\overline{t_{ij}}$  coincide con el tiempo medio usado en la anterior formulación. De igual modo esto sucede con los tiempos entre origen y destino de una tarea,  $t_i$ , donde en este caso el tiempo medio será  $\overline{t_i}$ . Se denotará por  $\mathbf{T}$  el conjunto de todas estas variables.

Ahora algunas variables del problema se redefinen ligeramente:

- $st_i^O$ : instante a partir del cual podría comenzar la carga del contenedor en el origen de la tarea  $i$ .
- $st_i^D$ : instante a partir del cual podría comenzar la descarga del contenedor de la tarea  $i$  en el destino.

Una solución del problema  $[\mathbf{X}, \mathbf{ST}]$ , proporciona una probabilidad de llegada al origen y al destino de una tarea  $i$  en el instante  $t$ , simbolizado por  $p_i^O(t)$  y  $p_i^D(t)$ .  $\mathbf{X}$  y  $\mathbf{ST}$  denotan el conjunto de todas las variables del problema.

Si en la formulación determinista se conocía el coste del incumplimiento de las restricciones temporales de las tareas, en este caso se tratará de un valor esperado, dependiente de las funciones de distribución de los tiempos de tránsito, de la solución

de rutado seleccionada, y de la estructura de las ventanas temporales. Si se identifica  $c_i^O(t)$  y  $c_i^D(t)$  como el coste de llegar al origen y destino, respectivamente, de una tarea  $i$  en el instante  $t$ , el coste esperado debido a incumplimientos en la llegada al origen o destino de una tarea se identificará con las siguiente funciones:

$$\overline{C_i^D}(\mathbf{X}, \mathbf{ST}, \mathbf{T}) = \int c_i^D(t) \cdot p_i^D(t, \mathbf{X}, \mathbf{ST}, \mathbf{T}) dt \quad (5.22)$$

$$\overline{C_j^O}(\mathbf{X}, \mathbf{ST}, \mathbf{T}) = \int c_j^O(t) \cdot p_j^O(t, \mathbf{X}, \mathbf{ST}, \mathbf{T}) dt \quad (5.23)$$

El resto de variables y parámetros coincide con las del caso determinista, siendo la formulación del problema estocástico la presentada a continuación:

$$\begin{aligned} OF : \min & \left( \sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r} \sum_{j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}} d_{ij} x_{ij} + c_v \sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini}} nv_i + \right. \\ & \left. + \sum_{i \in \mathcal{T}} \left( \overline{C_i^D}(\mathbf{X}, \mathbf{ST}, \mathbf{T}) + \overline{C_j^O}(\mathbf{X}, \mathbf{ST}, \mathbf{T}) \right) \cdot x_{ij} \right) \end{aligned} \quad (5.24)$$

sujeto a:

$$\sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}, \quad (5.25)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini}, \quad (5.26)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r} x_{ij} - \sum_{i \in \mathcal{T}_r \cup \mathcal{T}_f^{end}} x_{ji} = 0 \quad \forall j \in \mathcal{T}_r, \quad (5.27)$$

$$st_i^O \geq E_i^O \quad \forall i \in \mathcal{T}, \quad (5.28)$$

$$st_i^D \geq E_i^D \quad \forall i \in \mathcal{T}, \quad (5.29)$$

$$st_i^D \geq st_i^O + s_i^O + t_i \quad \forall i \in \mathcal{T}, \quad (5.30)$$

$$x_{ij}(st_i^D + s_i^D + t_{ij} - st_j^O) \leq 0 \quad \forall i, j \in \mathcal{T}, \quad (5.31)$$

$$\left( \sum_{j \in \mathcal{T}_r} x_{ij} \right) - uv_i \leq nv_i \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini}, \quad (5.32)$$

$$st_i^O \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{T}, \quad (5.33)$$

$$st_i^D \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{T}, \quad (5.34)$$

$$x_{ij} \in 0, 1 \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}^I, j \in \mathcal{T}^E \cup \mathcal{T}_f^{end}, \quad (5.35)$$

$$nv_i \in 0, 1 \quad \forall i \in \mathcal{T}_f^{ini}, \quad (5.36)$$

$$(5.37)$$

### 5.3.3. Consideraciones sobre tareas flexibles

No considerar tareas flexibles es una de las simplificaciones realizadas en este trabajo. Aunque posteriormente no se considerarán en los algoritmos desarrollados, si se considera importante explicar qué matizaciones habría que realizar en la formulación desarrollada para la inclusión de este tipo de tareas, las cuales fueron introducidas por Smilowitz (2006).

El conjunto de tareas reales,  $\mathcal{T}_r$ , sería dividido entre el conjunto de tareas reales bien definidas,  $\mathcal{T}_r^{WD}$ , y el de tareas reales flexibles,  $\mathcal{T}_r^F$ . Se definirá también el conjunto de posibles realizaciones de una tarea flexible  $i \in \mathcal{T}_r^F$ , el cual se nombrará como  $\Upsilon_i$ .

A la hora de realizar la formulación, la principal diferencia sería la posibilidad de escoger cualquiera de las posibles realizaciones,  $\Upsilon_i$ , de una tarea ficticia. Sólo se podría escoger una de las posibles realizaciones, lo cual se impone a través de la restricción mostrada en las ecuaciones (5.38).

$$\sum_{i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r} \sum_{e \in \Upsilon_j} x_{ie} = 1 \quad \forall j \in \mathcal{T}_r^F, \quad (5.38)$$

## 5.4. Resultados de interés para el desarrollo de la tesis

De todas las posibles líneas de mejora del transporte intermodal de mercancías, esta tesis se ha centrado en la optimización del acarreo terrestre.

Este capítulo ha definido ampliamente el problema a resolver y analizado toda la bibliografía específica existente hasta la fecha. Una vez estudiada la misma, ha realizado una formulación del problema desde un prisma totalmente diferente a los planteados hasta el momento.

La formulación que se ha planteado está enfocada a poder integrar en la resolución del problema las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, que permitirían disponer de una mayor información en tiempo real. Para ello se ha planteado una formulación que resuelve una instantánea de un problema de acarreo, donde cada tarea o vehículo puede encontrarse en un estado diferente. Para resolver es problemática se han creado unas tareas ficticias, que recogen información sobre el vehículo y la tarea que estén realizando en ese momento.

Se ha realizado una formulación tanto determinista como estocástica, diseñada de tal modo que pueda ser aplicada tanto en entornos estáticos como dinámicos. Además, aunque en un principio sólo se han considerado tareas bien definidas de importación y exportación, se han descrito los cambios necesarios para incluir tareas flexibles.

## Asignación dinámica a través del conocimiento en tiempo real de la posición de la flota

Como ya se ha comentado en varias ocasiones, el principal objetivo de esta tesis es demostrar que los procesos actuales de optimización de rutas de vehículos no son todo lo eficientes que se desearía cuando se desarrollan en entornos reales donde diferentes elementos de incertidumbre aparecen.

La forma clásica de optimizar estos procesos se ha desarrollado desde una perspectiva estática; al principio de la jornada, el *decisor* presenta las rutas que los diferentes vehículos deberán desarrollar durante la jornada. Si se presenta algún tipo de incidente en el tráfico de los vehículos, puede que las rutas planteadas al principio de la jornada no puedan llevarse a cabo según las restricciones temporales comprometidas.

Múltiples estudios ponen de manifiesto la importancia del valor de la información a la hora de elegir rutas por los usuarios ([Levinson, 2003](#); [Chorus et al., 2006](#)). Sin embargo esa obviedad no había sido llevada a la forma de optimización de las rutas. [Adbdel-Aty et al. \(1997\)](#) señalan que esta información puede ahorrar tiempo. Estudiar la forma y el momento en el que esta información es suministrada es importante para que esta sea realmente útil ([Koutsopoulos y Xu, 1993](#)).

La forma propuesta en esta tesis plantea la optimización de la jornada desde una perspectiva dinámica, de manera que la solución va evolucionando a lo largo de la jornada, adaptándose a las circunstancias que vayan aconteciendo. Este proceso se realiza ayudado por el conocimiento en tiempo real de la posición de los vehículos. Numerosos estudios sobre problemas de rutado dinámico pueden encontrarse en la literatura ([Psaraftis, 1995](#); [Pillac et al., 2012](#)), estos suelen estar centrados en la incertidumbre que

presentan que un determinado cliente requiera el servicio, y no en la incertidumbre en el tiempo de tránsito.

El presente capítulo comienza presentando la estructura del sistema planteado, definiendo cada una de sus partes. Seguidamente se enumeran posibles eventos que pueden llevar al lanzamiento de una reoptimización. Luego se explica cómo se guarda la información en tiempo real que es suministrada al sistema, de forma que pueda ser fácilmente interpretada por los algoritmos de optimización. Por último, se hace una breve exposición de las tecnologías actualmente existentes que nos llevan a plantear la propuesta como realista.

## 6.1. Estructura global del sistema de planificación de tareas de acarreo

Desde esta tesis se propone una optimización dinámica del DDPTW. Para comprender el proceso de asignación dinámica que se describirá posteriormente es necesario conocer el sistema global en el que tendrá lugar el tratamiento de la nueva información adquirida. Es por eso que en este epígrafe se describe la estructura global del sistema de planificación.

La Figura 6.1 muestra, de modo esquemático, la arquitectura prevista del sistema. Este sistema recibiría diversos tipos de informaciones, que serían posteriormente utilizadas como datos para la ejecución del algoritmo dinámico de asignación:

- Solicitudes de tareas, que podrían ser directamente incorporadas al sistema por parte de los clientes del mismo.
- Información sobre la posición de los vehículos en el viario. Está posición puede ser determinada según diferentes tecnologías existentes, como podrá verse en el epígrafe 6.6. En la figura se ejemplifica a través de dos posibles sistemas: GPS o Galileo.
- Información sobre la compleción de tareas, proporcionada por los conductores de los vehículos al sistema a través del correspondiente interfaz de comunicaciones.
- Por último, y de manera opcional, el sistema podría contar con información actualizada sobre el estado del viario (fundamentalmente el grado de congestión y la velocidad media en los diferentes tramos del mismo), en caso de que esta información estuviera disponible. De esta manera, el sistema, además de reorganizar las rutas asociadas a las tareas basándose en estimaciones de las velocidades medias en el viario, podría recalcular las rutas atendiendo a valores mucho más cercanos a la realidad.

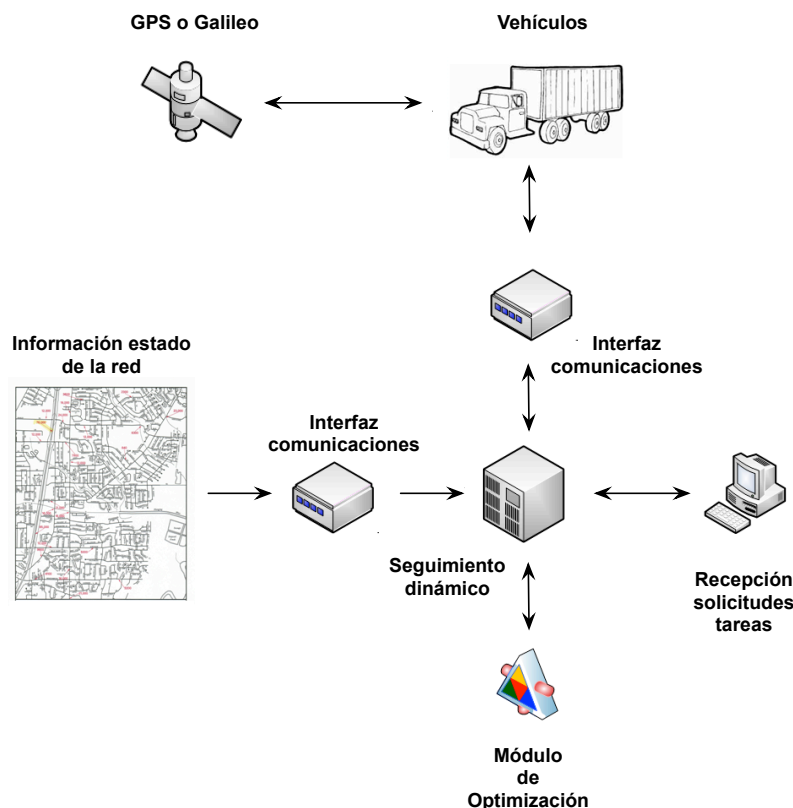


FIGURA 6.1: Sistema global de optimización dinámica

La comunicación entre los interfaces y el sistema, o entre los clientes y el sistema, se realizaría a través de internet móvil, lo que hace necesaria la existencia de interfaces de comunicaciones con los vehículos y con la información en tiempo real sobre el viario. Además, queda reflejada la ubicación del algoritmo de optimización dinámica dentro de la arquitectura global, como el encargado de asignar en tiempo real tareas pendientes a vehículos.

## 6.2. Metodología dinámica de optimización

La metodología dinámica que se plantea va mejorando la solución iterativamente. Al principio de la jornada, se lanza una optimización inicial al problema, que permitirá poseer una solución de partida. Sin embargo, dado que el tiempo de tránsito es incierto, se hace imposible conocer a priori el tiempo exacto requerido para completar una tarea; y por lo tanto, aparecen desajustes entre la realidad y lo esperado según la solución planteada al principio.

Para corregir dichos desajustes se ha planteado una metodología dinámica de optimización. En ciertos momentos se lanzan reoptimizaciones en búsqueda de una solu-

ción que se adapte mejor a las circunstancias reales existentes, y que pueden corregir los previsibles retrasos, o incluso adelantos, en la ejecución de las tareas. Esta reoptimización habrá tenido en cuenta las circunstancias reales que acontecen y sólo considerará las tareas pendientes de ejecutar. La nueva solución podrá cambiar la asignación de tareas a vehículos, teniendo en cuenta que los vehículos que se encuentran ejecutando tareas en ese momento deberán terminarlás antes de poder empezar con una nueva. Para ayudar a solventar toda la casuística en la que pueden encontrarse los vehículos se han definido unas *tareas ficticias*, ver epígrafe 6.4, que contienen información sobre la posición de los vehículos y sobre las posibles tareas que estarían ejecutando.

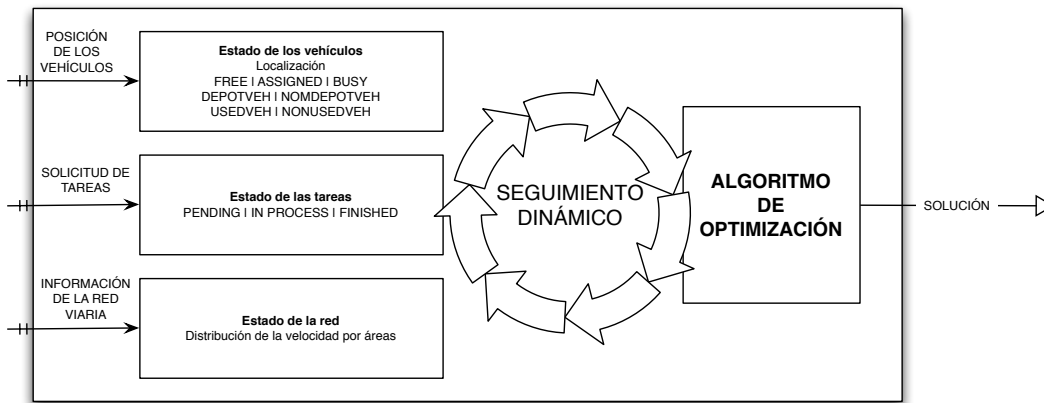


FIGURA 6.2: Esquema del seguimiento dinámico

Un esquema de todo este proceso es representado en la Figura 6.2, donde se aprecia que el sistema siempre está informado de la posición en la que se encuentran los vehículos.

Como ejemplo se puede considerar un caso con dos vehículos y seis tareas; cuatro de dichas tareas se tratan de tareas de exportación y dos de ellas son tareas de importación. Los vehículos comienzan la jornada en el depósito y deben completar todas las tareas, retornando nuevamente al depósito. Con la información de la que se dispone al principio de la jornada, el sistema considera como mejor solución la mostrada a continuación y también en la Figura 6.3a; la misma se encuentra atendiendo a las restricciones temporales mostradas en la Tabla 6.1 y los tiempos de desplazamientos esperados, que pueden verse en los enlaces de la Figura 6.3.

- VEH 1: Ini(Depot)  $\rightarrow$  1  $\rightarrow$  2  $\rightarrow$  4  $\rightarrow$  6  $\rightarrow$  End(Depot)
- VEH 2: Ini(Depot)  $\rightarrow$  3  $\rightarrow$  5  $\rightarrow$  End(Depot)

En el caso que los tiempos de desplazamiento a lo largo de la ruta coincidieran con los tiempos esperados<sup>1</sup>, las distintas tareas serían atendidas en los instantes que se muestran en la Tabla 6.2.



TABLA 6.1: Ventanas temporales en vehículos del ejemplo

Tarea	E	L	O/D
1	0	30	O
2	50	80	D
3	60	90	D
4	60	90	O
5	120	150	D
6	130	160	D

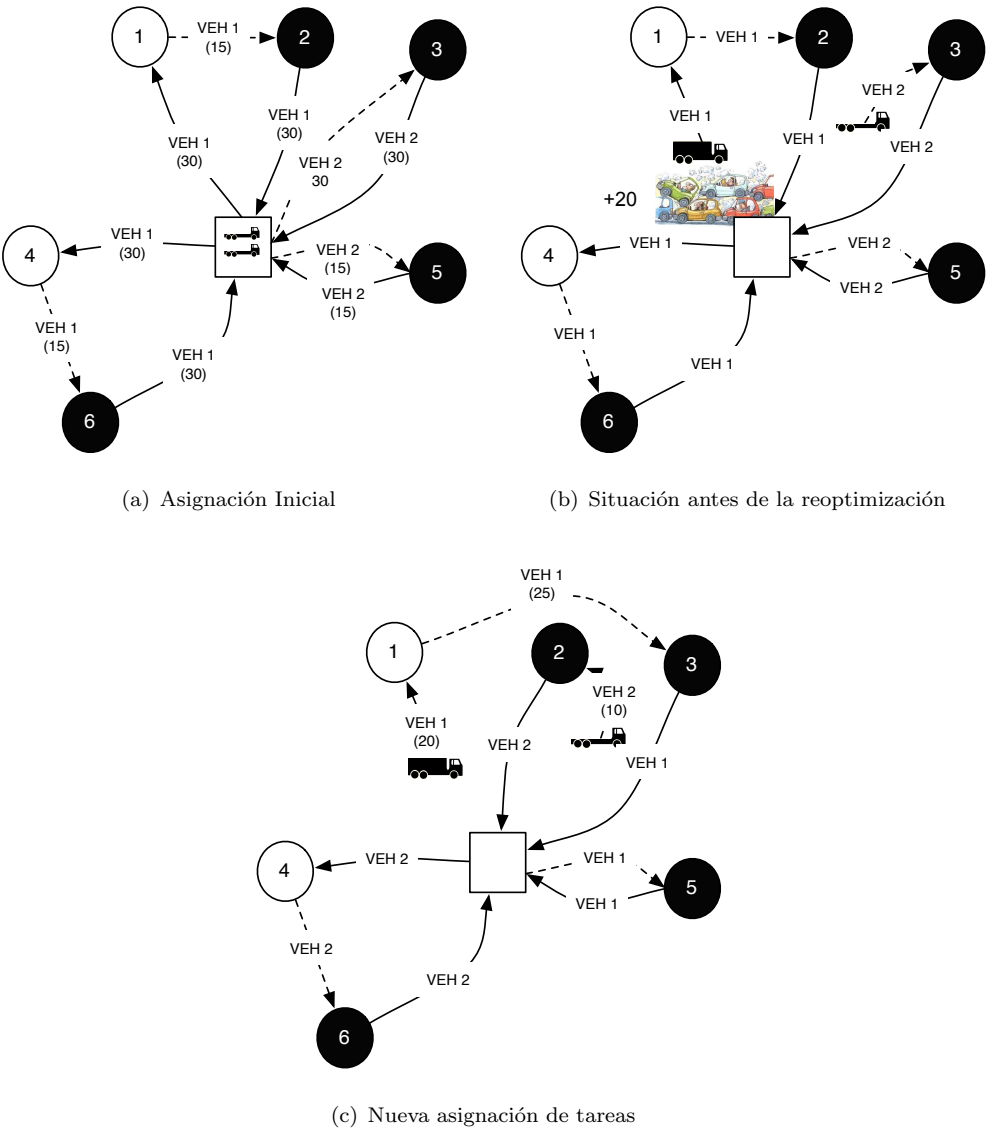


FIGURA 6.3: Ejemplos de reoptimización

TABLA 6.2: Tiempos de ejecución de las tareas del ejemplo - sin retrasos

Tarea	Vehículo	Llegada Origen	Llegada destino	¿Cumple TW?
1	1	0	30	Sí
2	1	45	75	Sí
3	2	30	60	Sí
4	1	75	105	Sí
5	2	75	90	Sí
6	1	120	150	Sí

Entonces, supóngase que cuando la primera reoptimización es llevada a cabo (en el minuto 25, por ejemplo), el primer vehículo está realizando la tarea 1 y el segundo vehículo ésta todavía viajando hacia el origen de la tercera tarea, luego está no ha comenzado a realizarse todavía; como se muestra en la Figura 6.3b. Sin embargo, las condiciones de tráfico han sido distintas de las esperadas y el primer vehículo se encuentra retrasado (sobre 20 minutos) sobre su localización esperada. En este caso, los nuevos tiempos de llegada a las diferentes tareas se muestran en la Tabla 6.3. Como se puede comprobar, si se sigue con la misma planificación varias tareas no puedan ser llevadas a cabo dentro de sus restricciones temporales.

TABLA 6.3: Tiempos de ejecución de las tareas del ejemplo - con retrasos

Tarea	Vehículo	Llegada Origen	Llegada destino	¿Cumple TW?
1	1	0	50	Sí
2	1	65	95	No
3	2	30	60	Sí
4	1	95	125	No
5	2	75	90	Sí
6	1	140	165	No

Si existiera la posibilidad de una optimización dinámica, el sistema podría sugerir cambiar la programación a una que se adapte mejor a las circunstancias, como es la mostrada en la Figura 6.3c.

- VEH 1: Ini(Tarea 1 in process)  $\rightarrow$  3  $\rightarrow$  5  $\rightarrow$  End(Depot)
- VEH 2: Ini(\*)  $\rightarrow$  2  $\rightarrow$  4  $\rightarrow$  6  $\rightarrow$  End(Depot)

Ahora, la asignación de tareas a vehículos ha cambiado pasando el primer vehículo a realizar la tarea 3 cuando termine con la 1, y el segundo vehículo se dirigirá a la tarea 2. Adaptando dicha solución, los vehículos servirían las tareas en los

<sup>1</sup>Se ha considerado tiempos de servicio nulos

instantes presentados en la Tabla 6.4. Como se puede comprobar todas las restricciones temporales vuelven a cumplirse.

TABLA 6.4: Tiempos de ejecución de las tareas del ejemplo - Reoptimización

Tarea	Vehículo	Llegada Origen	Llegada destino	¿Cumple TW?
1	1	0	50	Sí
2	2	35	65	Sí
3	1	75	105	Sí
4	2	65	95	Sí
5	1	120	135	Sí
6	2	110	140	Sí

### 6.3. Eventos de reoptimización

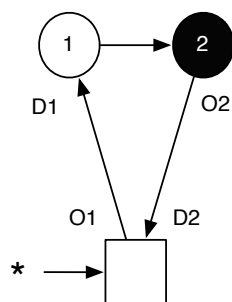
Las reoptimizaciones comentadas se lanzan cuando ocurren algunas circunstancias destacables, llamadas *eventos de reoptimización*. Cuatro eventos distintos han sido propuestos:

- Un tiempo fijo.
- Al terminar una tarea.
- Cuando un vehículo se desvía de su posición deseable un determinado factor.
- En un instante crítico.

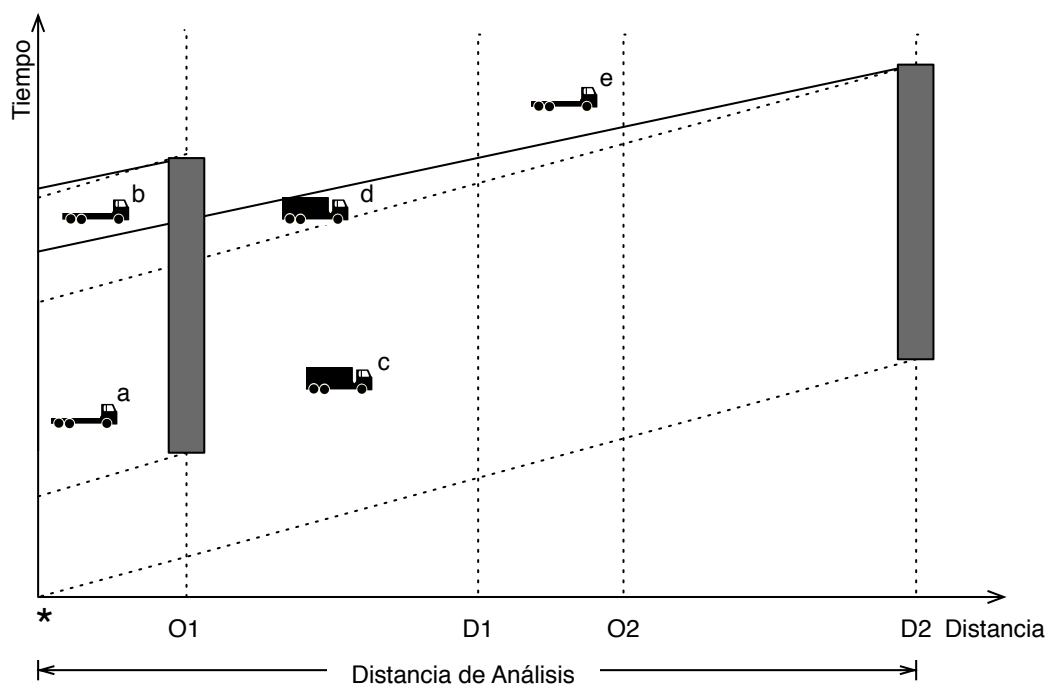
El procedimiento iterativo de mejora no tiene por qué tener en cuenta todos los eventos de reoptimización señalados; será necesario establecer una solución de compromiso entre capacidad de adaptación y el número de reoptimizaciones.

Los dos primeros eventos son sencillos de comprender. En el primero la reoptimización se lanza cada cierto tiempo, cuando ha transcurrido un tiempo desde la anterior reoptimización. Este tiempo es fijado a priori, por ejemplo 15 minutos. En el segundo tipo de evento la reoptimización se lanza al concluir la ejecución de una tarea; de ese modo, antes que el conductor que acaba de terminar la tarea se dirija a la siguiente tarea, se examina si las condiciones del entorno han cambiado, y por tanto pueden existir mejores alternativas.

El tercer evento de reoptimización lanza la misma cuando los vehículos se retrasan de las posiciones esperadas, intentando buscar soluciones que no tengan dificultades en alcanzar determinadas tareas. Una explicación del lanzamiento puede verse en la Figura 6.4. La Figura 6.4a muestra la asignación inmediata de un determinado vehículo,



(a) Ejemplo de asignación



(b) Esquema espacio-temporal

FIGURA 6.4: Reoptimización por desviación de la posición esperada

tareas 1 y 2; y la Figura 6.4b muestra el esquema espacio-temporal para el cumplimiento de las ventanas temporales de las dos tareas que el vehículo tiene asignadas a priori. Si un vehículo se encuentra dentro de las franjas marcadas por líneas discontinuas para una determinada ventana temporal, entonces se encuentra dentro de una posición esperada para completar la tarea a tiempo; si el mismo se encuentra por encima de la línea discontinua superior y por debajo de la línea continua entonces el vehículo se encuentra retrasado respecto a su situación esperada, pero su desviación respecto a la posición esperada está dentro de un factor de tolerancia; si el vehículo se encuentra por encima de dicha línea continua, se hace necesaria una reoptimización, en búsqueda de soluciones más fiables. Las tareas que se analizarán de las asignadas al vehículo serán las que se encuentran dentro de una distancia de análisis. Siguiendo con el ejemplo de la Figura

6.4b un vehículo en la situación de **a** se encuentra dentro de su posición esperada para cumplir a tiempo la tarea 1 y la tarea 2; si el mismo se encontrara en la situación de **b** podría cumplir las restricciones temporales de la tarea 1, sin embargo es previsible que tenga dificultades para cumplir las restricciones temporales de la tarea 2, por lo que atendiendo a la distancia de análisis se lanzaría una reoptimización; en la situación **c** el vehículo se encuentra en una situación esperada para desarrollar la tarea 2; un vehículo en **d** se habría desviado y estaría algo retrasado, pero se encontraría dentro la ventana de tolerancia; por último, un vehículo en la situación **e** estaría retrasado para poder completar a tiempo la tarea 2, y se produciría una reoptimización, con la espera de poder encontrar una solución mejor del problema.

El último de los eventos indicados lanza una reoptimización cuando se alcanza el *instante crítico* de una determinada tarea. Este instante se define como el momento en el que un vehículo necesitaría salir del depósito para poder realizar a tiempo la tarea correspondiente. Por ejemplo, la tarea 6 del ejemplo de la Tabla 6.1 necesita ser servida antes del minuto 160, tardándose en el trayecto de ida y vuelta desde el depósito 60 minutos; sería interesante lanzar una reoptimización antes del minuto 100, de modo que si está sucediendo algo que impide a los vehículos que están fuera del depósito servir dicha tarea a tiempo, se pueda poner en servicio un nuevo vehículo que se dirija inmediatamente a servir la tarea 6. Este tipo de evento de reoptimización será siempre un complemento de los anteriores, y nunca el algoritmo dinámico funcionará con el sólo.

## 6.4. Estado de las tareas y vehículos

Cuando una reoptimización tiene lugar, se toma una instantánea de todo el sistema. Esta proporcionará información sobre la localización de los vehículos, el estado en el que se encuentran los mismos, y el nivel de desarrollo de las tareas. Será esta instantánea la que trate de optimizar el modelo matemático propuesto en el anterior capítulo.

Los vehículos pueden encontrarse en varios estados: FREE, BUSY y ASSIGNED. Un vehículo se considera BUSY, ocupado, si está llevando a cabo una tarea; se considera ASSIGNED, asignado, si se está desplazándose hacia el origen de una tarea; y se considera FREE, libre, si no tiene ninguna tarea asignada en ese momento; en ese caso el vehículo puede encontrarse en el depósito o dirigiéndose al mismo. El sistema también posee información de qué vehículos se encuentran en el depósito, DEPOTVEH, y cuáles no. De igual modo posee información sobre los vehículos que han sido usados, USEDVEH, y los que no, NONUSEDVEH. Esta última información es especialmente útil debido a la estructura de costes del problema mostrada en el capítulo anterior.

Las tareas pueden encontrarse en tres posibles estados: PENDING, IN PROCESS y FINISHED. Una tarea se considera PENDING, pendiente, si todavía no

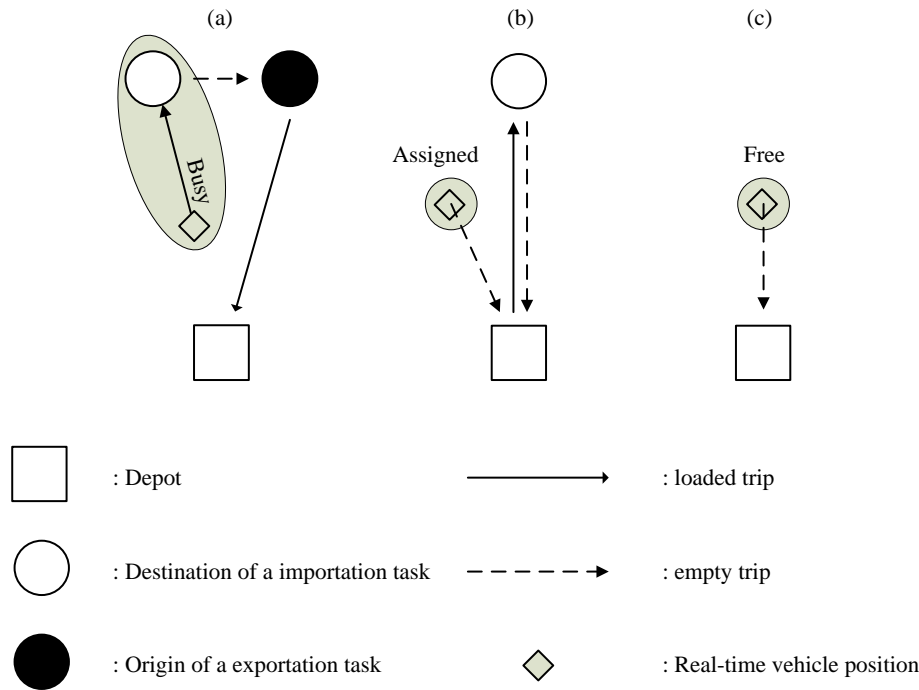


FIGURA 6.5: Tareas ficticias

ha sido llevada a cabo; cuando un vehículo está llevándola a cabo se considera una tarea IN PROCESS, en proceso; siendo las tareas FINISHED, finalizadas, las que ya han sido completadas.

La información de los vehículos y de las tareas en proceso, que por lo tanto deberán ser completadas por el vehículo que las lleva a cabo, se encuentra almacenada gracias a unas tareas ficticias. La Figura 6.5 muestra la información que contendría estas tareas ficticias, representadas por óvalos grises. En el caso de vehículos que se encuentran en un estado FREE o ASSIGNED, la información que contendría estas tareas sería la posición del vehículo tanto para el origen como para el destino de la tarea, siendo el tiempo de servicio igual a cero, y estando sus ventanas temporales definidas respecto al instante en el cual se produce la reoptimización. De ese modo tras la reoptimización el sistema fuerza al vehículo a seguir sin interrupción. En el caso de vehículos que se encuentran BUSY, y por tanto rindiendo una tarea IN PROCESS la tarea ficticia contiene información sobre todo lo que queda por realizar de la tarea, y sobre la localización del vehículo; el origen de la tarea ficticia sería la localización del vehículo, su ventana temporal en el origen sería el instante en el que se produce la reoptimización, mientras que el destino y ventana temporal del mismo sería la de la tarea original que se encuentra en proceso.

Toda la casuística que puede producirse en las tareas ficticias de un vehículo  $v$  se muestra en la Tabla 6.5, donde vienen definidos el origen y destino de la tarea,

el tiempo de servicio y las ventanas temporales. La posición en la que se encuentra el vehículo en el momento de la reoptimización es marcada con el símbolo  $*$ , y el instante en el que la reoptimización es llevada a cabo se define como  $time$ . En todas las tareas ficticias el origen de la misma coincide con la posición en la que se encuentra el vehículo y su ventana temporal de inicio se define como  $[time, time]$ , forzando de ese modo la inmediata puesta a punto de la tarea.

En el caso de vehículos BUSY, que se encuentran realizando una tarea  $i$ , se usa la Figura 6.6 como apoyo para su entendimiento, mostrando qué tres situaciones diferentes pueden encontrarse. Si el vehículo se encuentra cargando el contenedor de la tarea  $i$ , caso BUSYa, entonces su tarea ficticia,  $f_v$ , será como la tarea  $i$  pero al tiempo de servicio en el origen hay que restarle el tiempo ya llevado a cabo. En el caso que el vehículo se encuentra en un punto entre el origen y el destino de la tarea  $i$ , caso BUSYb, la tarea ficticia  $f_v$  tiene los mismos parámetros en el destino que la tarea  $i$ , sin embargo su origen es la posición actual y no se considera tiempo de servicio en el mismo. Cuando el vehículo ya se encuentra descargando el contenedor en el destino, caso BUSYc, es importante almacenar el tiempo de servicio en el destino que queda pendiente.

TABLA 6.5: Casuística de tareas ficticias

Estado del Vehículo	Origen	Destino	$s_{f_v}^O$	$s_{f_v}^D$	$[E_{f_v}^O, L_{f_v}^O]$	$[E_{f_v}^D, L_{f_v}^D]$
FREE	*	*	0	0	$[time, time]$	$[time, time]$
ASSIGNED	*	*	0	0	$[time, time]$	$[time, time]$
BUSYa	O	D	$s_i^O - t_a$	$s_i^D$	$[time, time]$	$[E_i^D, L_i^D]$
BUSYb	*	D	0	$s_i^D$	$[time, time]$	$[E_i^D, L_i^D]$
BUSYc	D	D	0	$s_i^D - t_b$	$[time, time]$	$[time, time]$

## 6.5. Pseudocódigo de la metodología dinámica

Según todo lo descrito anteriormente, el Algoritmo 1 muestra el procedimiento de mejora continua de la solución. El algoritmo continuamente está procesando la entrada de nueva información mientras la jornada no haya terminado. Este hecho se denota por el cumplimiento de dos condiciones: se deben haber terminado todas las tareas y todos los vehículos deben estar de vuelta en el depósito. En caso de que alguna de dichas condiciones no se cumpla el algoritmo seguirá iterando (Línea 5).

En cada iteración, lo primero que realiza el sistema es la actualización sobre los datos que necesita conocer del entorno, es decir, la posición de los vehículos, el tráfico, y la descripción de las tareas, (Líneas 6, 7 y 8, respectivamente).

Una vez obtenida dicha información, se comprueba el estado en que se encuentran los vehículos (Línea 9) y las tareas (Línea 10); estos estados son los descritos en el

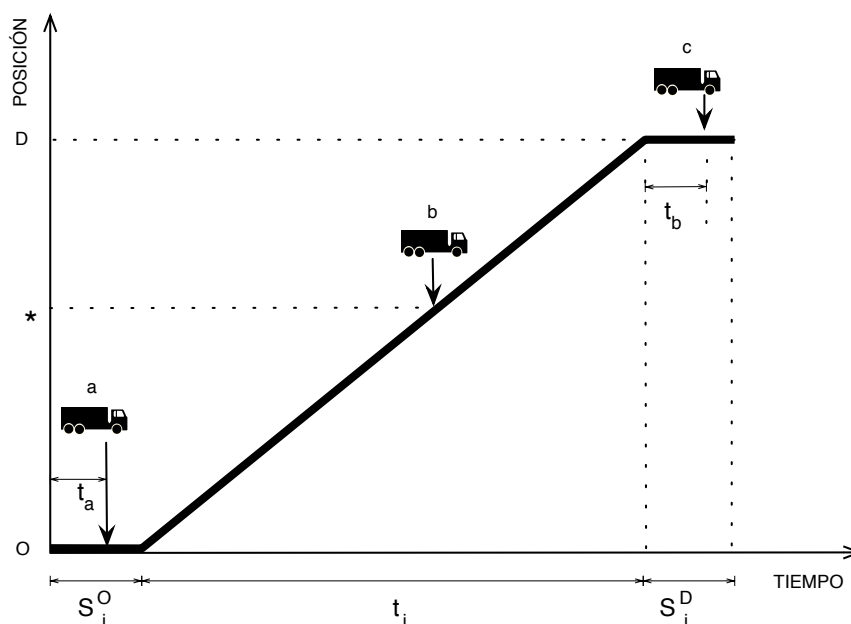


FIGURA 6.6: Posibles situaciones de vehículos BUSY

epígrafe 6.4. A través de toda la información recopilada es fácil comprobar la existencia de algún evento que dé lugar a la reoptimización (Línea 11), los cuales han sido descritos en epígrafe 6.3. Las variable  $uv_v$  fue usada en la formulación mostrada en el Capítulo 5, e indica si el vehículo  $v$  ha sido usado previamente.

En caso de existir tal evento, se llamará a la función que realizará la reoptimización de la asignación de tareas a vehículos (Línea 13), en el caso que fuera necesario. En el Capítulo 7 se exponen algunas propuestas de implementación de tal algoritmo de asignación, las cuales usarán toda la información que se va recopilando y actualizando a lo largo de este proceso dinámico.

## 6.6. Tecnologías existentes para el desarrollo de la metodología

La metodología de optimización propuesta se basa principalmente en el conocimiento en tiempo real de la posición de los vehículos y de modo opcional, como posible puerta a una mayor mejora, en el conocimiento del estado del tráfico. Estas dos suposiciones, que hace sólo algunos años podrían considerarse una quimera, son hoy en día una realidad gracias al desarrollo de las TICs. Giannopoulos (2004) examina las posibilidades que las tecnologías de la información tienen dentro del transporte, donde señala que la información extra que pueden proporcionar podría reducir la incertidumbre en los tiempos de viaje y la construcción de rutas en tiempo real que permitan evitar la



---

**Algoritmo 1** Metodología dinámica

---

```

1:  $vpos_v \leftarrow \text{DEPOTVEH}$ 
2:  $tstate_t \leftarrow \text{UNFINISHED}$ 
3:  $assign \leftarrow \emptyset$ 

4: procedure REALTIMEOPTIMIZATION( $vpos_v, tstate_t, assign$ )
5:   while  $[(\exists tstate_t \neq \text{FINISHED}) \wedge (\exists vpos_v \neq \text{DEPOTVEH})] \forall v \in \mathcal{V}, t \in \mathcal{T}$  do
6:      $vpos_v \leftarrow \text{VEHICLEPOSITIONREAD}()$   $\forall v \in \mathcal{V}$ 
7:      $\mathcal{T} \leftarrow \text{TASKSREAD}()$ 
8:      $traffic \leftarrow \text{TRAFFICREAD}()$ 
9:      $vstate_v, uv_v \leftarrow \text{VEHICLESTATECHECK}(vpos_v, assign, \mathcal{T}) \quad \forall v \in \mathcal{V}$ 
10:     $tstate_t \leftarrow \text{TASKSTATECHECK}(vpos_v, assign, \mathcal{T}) \quad \forall v \in \mathcal{V}$ 
11:     $event \leftarrow \text{REOPTEVENTCHECK}(time, vpos_v, \mathcal{T}, tstate_t, vstate_v, assign)$ 
12:    if  $event = \text{TRUE}$  then
13:       $assign \leftarrow \text{DASSIGN}(\mathcal{T}, time, vpos_v, vstate_v, uv_v, tstate_v, traffic, assign)$ 
14:    end if
15:  end while
16: end procedure

```

---

congestión.

Conocer la posición en tiempo real de una flota de vehículos es hoy en día una realidad gracias a los *sistemas globales de navegación por satélite*, GNSS, y a los *sistemas de información geográficas*, GIS (Sadoun y Al-Bayari, 2007); además, otras posibilidades de posicionamiento menos precisas son posibles gracias a la triangulación en las redes de telefonía móvil.

Los GNSS, a través de una constelación de satélites, permiten la determinación de las coordenadas geográficas de un determinado dispositivo. En la actualidad existen dos sistemas en funcionamiento, NAVSTAR-GPS y GLONASS, y algunos más en desarrollo, entre los que destaca el europeo Galileo. Mintsis et al. (2004) y el Libro Verde de la European Commission (2006) analizan las “aplicaciones de la navegación por satélite”, identificando algunos de sus usos dentro del mundo del transporte y la logística; señalando que:

*“Los sistemas GNSS proporcionan instrumentos que permiten la introducción de mejoras en el ámbito logístico. Al permitir un seguimiento y rastreo preciso y continuo de las cajas, contenedores o pallets, el GNSS, complementado con otras tecnologías tales como los dispositivos de identificación de frecuencias, está mejorando la gestión de las cadenas de abastecimiento y la gestión de las flotas de todos los modos de transporte, tanto en zonas urbanas como en viajes de larga distancia. Por otro lado, en el contexto de las aplicaciones multimodales, la utilización de sellos electrónicos y de otros dispositivos sensibles a la localización puede mejorar las condiciones de seguridad.”*

Los GIS permiten almacenar una ingentes cantidad de información relativa

a una zona geográfica, la cual puede ser usada para optimizar los procesos logísticos que en dicha zona se desarrollan (Tarantilis et al., 2004; Rodríguez, 2007). Si estos sistemas se encuentran comunicados con los centros de información del tráfico, podrían proporcionar información del tráfico en tiempo real (Wahle et al., 2001). Casos reales pueden encontrarse en diferentes ciudades, como los sistemas VICS (*Vehicle Information and Communication System*) puestos en servicio en Japón (Qureshi et al., 2012) o el proyecto *Mobile Millennium* que a través de un software incluido en teléfonos móviles, y de la localización de los mismos por satélite es capaz de establecer el nivel del tráfico en tiempo real (Herrera et al., 2010).

Estos sistemas necesitan de la transferencia de información entre los diferentes actores involucrados, para que de ese modo puedan tener acceso real a la información necesaria. Gracias a los dispositivos móviles existentes esa problemática está tecnológicamente resuelta. Dürr y Giannopoulos (2003) realizan el intercambio de información a través de datos representados como *eXtended Marked Language* (XML) en un sistema que intenta integrar la información existente en un sistema intermodal.

## 6.7. Resultados de interés para la tesis

El presente capítulo, que es el eje central de la tesis, ha planteado un sistema para optimizar el acarreo terrestre haciendo uso de información en tiempo real. En él se ha explicado detalladamente qué información es suministrada al sistema y cómo sería tratada la misma para que posteriormente pueda ser usada por las diferentes heurísticas y algoritmos de optimización que puedan plantearse.

Dicha información es suministrada al sistema en unos instantes llamados *eventos de reoptimización*, los cuales se han explicado y definido detalladamente.

Además, se ha justificado la viabilidad del sistema planteado atendiendo a las tecnologías que actualmente existen.

## Módulo de optimización de tareas de acarreo - heurísticas

En el Capítulo 6 se ha descrito el sistema dinámico de mejora del acarreo terrestre, el cual tiene como núcleo central el *módulo de optimización*. Dicho módulo, tomando la información actualizada proporcionada por el sistema, propone el *scheduling* más adecuado para ejecutar las tareas que han de ser llevadas a cabo.

Este planteamiento dinámico está basado en la reoptimización, buscando soluciones mejor adaptadas cuando las circunstancias cambian. Podría plantearse como solución trivial del *módulo de optimización* usar las mismas heurísticas que venían empleándose para la resolución de problemas estáticos, como las citadas en la revisión bibliográfica del capítulo anterior. Sin embargo, la realidad se muestra contraria a esta idea debido a las muchas diferencias en el planteamiento de ambos problemas: por un lado, una metodología dinámica requiere de una velocidad de respuesta más elevada que las metodologías estáticas, los usuarios del sistema no pueden permanecer esperando una respuesta excesivo tiempo; por otro lado, en un planteamiento dinámico el problema a resolver va evolucionando, lo que hace que los algoritmos tengan que considerar la posibilidad de tareas a medio ejecutar, vehículos en tránsito, etc.

Este capítulo planteará una serie de heurísticas que pueden ser incluidas en el módulo de optimización; aunque tienen fundamentos similares a heurísticas empleadas en entornos estáticos, han sido adaptadas a entornos dinámicos. Todas ellas son analizadas y parametrizadas con el objeto de conocer cuál es la que mejor adaptación presenta al problema. Para poder testear las diferentes heurísticas propuestas se ha desarrollado un entorno de simulación (Ver Apéndice A). Todas las heurísticas serán en un primer paso testeadas en un entorno determinista, para poder contemplar el rendimiento de cada una de ellas en el entorno más simple; se parte de la premisa que la heurística seleccionada deberá no sólo funcionar en situaciones que requieran cambiar la asignación de vehículos

a lo largo de la jornada, sino también en los casos en los que todo ocurre según lo esperado.

## 7.1. Heurística de ahorro en costes

La primera heurística que se propone es una adaptación a problemas dinámicos de la heurística originalmente propuesta por [Clarke y Wright \(1964\)](#). Dicha heurística busca ahorrar costes a través del solape de las diferentes rutas.

Siguiendo el trabajo de [Solomon \(1987\)](#) para el VRPTW, la heurística comienza con  $n$  rutas distintas en las que cada vehículo servirá una tarea real distinta; luego dichas rutas se irán solapando entre aquellas que produzcan mayor ahorro.

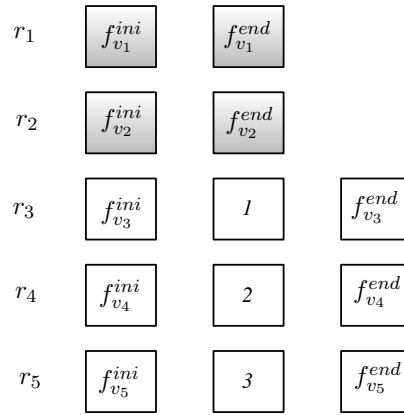


FIGURA 7.1: Ejemplo de inicialización de la heurística de ahorro en costes

Dado el carácter dinámico del problema a resolver, se han de considerar algunas particularidades en la inicialización de las rutas. Cada ruta será iniciada con un par de tareas ficticias de inicio y fin; si el vehículo al que representa dichas tareas ficticias se encuentra en el depósito, la ruta podrá además contener una tarea real. Un ejemplo de lo expuesto anteriormente se muestra en la Figura 7.1, donde cada cuadro representa una tarea, ya sea real o ficticia; los cuadros con leyenda  $f_{v_i}^{ini}$  y  $f_{v_i}^{end}$ , con  $i \in (1, 2, 3, 4, 5)$ , representan tareas ficticias. Se han sombreado algunas tareas como indicador de que los vehículos se encuentran fuera del depósito; por tanto en la iniciación de la ruta  $r_i$  no se puede agregar ninguna tarea extra, aparte de las ficticias, como ocurre en  $r_1$ ,  $r_2$ , y  $r_3$ . Las tareas ficticias no sombreadas representan a vehículos en el depósito y, como se muestra en las rutas  $r_4$  y  $r_5$ , se les ha agregado una tarea real.

Dichas rutas se irán uniendo atendiendo a aquellas uniones que produzcan mayor ahorro; el solape por la unión de dos rutas  $r_i$  y  $r_j$  se caracterizará por incorporar después de todas las tareas reales de la ruta  $r_i$  las tareas reales de la ruta  $r_j$ . El ahorro producido por la unión de dos rutas  $r_i$  y  $r_j$  estará caracterizado por la ecuación (7.1).

Diferentes escenarios se muestran en la Figura 7.2, que servirán de apoyo en la explicación de la ecuación (7.1).

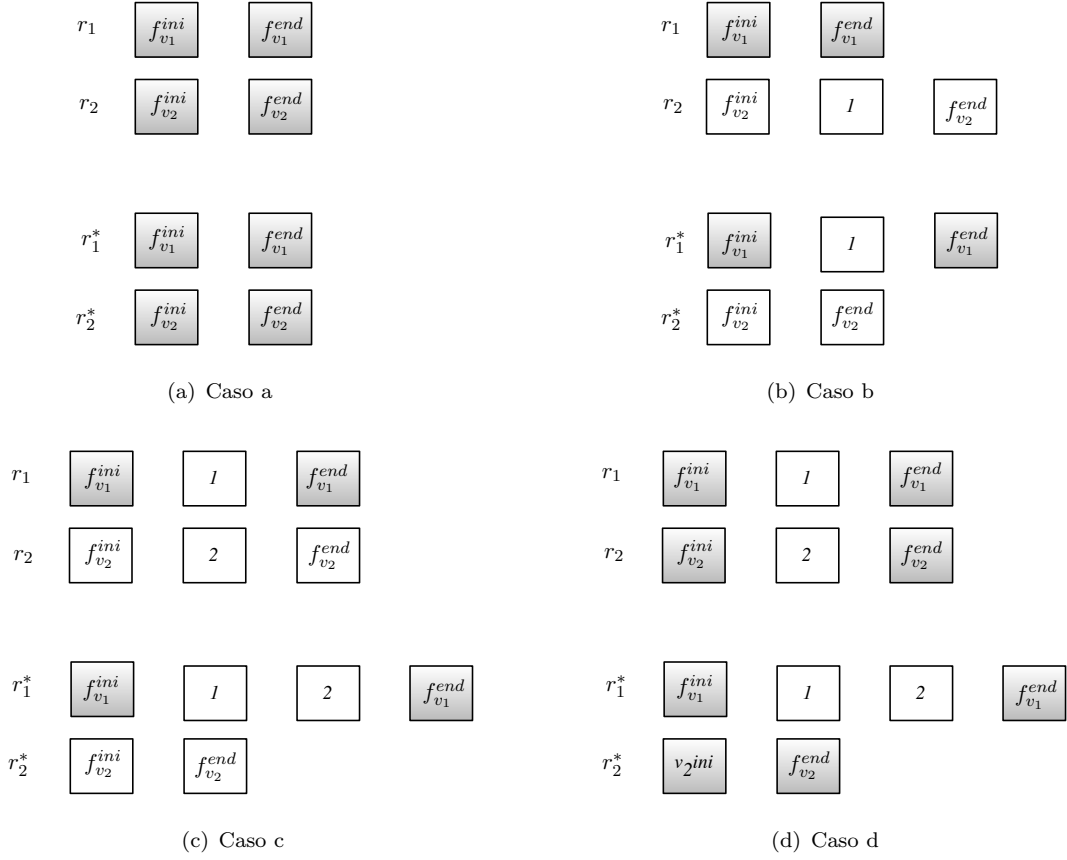


FIGURA 7.2: Ejemplo de solape entre rutas de la heurística de ahorro en costes

$$sav_{ij} = d_{i'l_0} + d_{0jf} - d_{i'l_jf} - d_{j'l_0} + vehsav_{ij} - violcost_{ij} \quad (7.1)$$

Los valores  $d_{i'l_0}$ ,  $d_{0jf}$ ,  $d_{i'l_jf}$  y  $d_{j'l_0}$  representan respectivamente: la distancia entre el destino de la última tarea real de la ruta  $r_i$  y el depósito, la distancia entre el depósito y el origen de la primera tarea real de la ruta  $r_j$ , la distancia entre el origen y destino mencionados anteriormente, y la distancia entre el destino de la tarea ficticia de inicio de la ruta  $r_j$  y el depósito. Estos cuatro primeros elementos de la ecuación (7.1) contabilizan el ahorro total en la distancia recorrida debido a la unión de las dos rutas. De ellos, los tres primeros elementos representan el ahorro al realizar conjuntamente las tareas reales de las rutas  $r_i$  y  $r_j$ <sup>1</sup>, mientras que el cuarto elemento representa el coste de la vuelta al depósito del vehículo de la ruta que queda vacía. Supóngase el caso c de la Figura 7.2; en tal caso el valor de  $d_{j'l_0}$  será cero dado que el vehículo se encuentra en el propio depósito, algo que no ocurre en el caso d.

<sup>1</sup>La Figura 7.8 muestra el porqué del ahorro

La función  $vehsav_{ij}$  representa el ahorro por el uso de un vehículo menos,  $c_v$ , el cual sólo será considerado si el vehículo no ha sido usado previamente. La información sobre el uso previo del vehículo vendría recogida en la variable  $uv$ ; dicha variable ha sido comentada en el Capítulo 5. Por ejemplo, en los casos b y c de la Figura 7.2 se produciría ahorro por el uso de un vehículo menos, mientras que en los casos a y d no se producirían tal ahorro.

La función  $violcost_{ij}$  representa el incremento de los costes por incumplimiento de ventanas temporales, el cual ha sido usado para priorizar el máximo cumplimiento posible de las ventanas temporales. Mientras Solomon (1987) obliga al estricto cumplimiento de una serie de ventanas temporales, el carácter estocástico del problema a resolver implica que este algoritmo no obliga al cumplimiento de las mismas pero penaliza su incumplimiento.  $violcost_{ij}$  será la diferencia entre los costes de incumplimiento de las ventanas temporales antes de la unión de las rutas y después de la unión; debido al incremento del número de tareas a realizar en la nueva ruta creada, las tareas incrementan su probabilidad de ser realizadas con retraso <sup>2</sup>.

Tras conocer los componentes de la función  $sav_{ij}$ , se analizarán nuevamente los cuatro casos representados en la Figura 7.2 de modo que sirvan de ayuda para el perfecto entendimiento de la heurística; las rutas existentes antes de la unión se representan como  $r_i$  y las rutas después de la unión se representan como  $r_i^*$ . El caso **a** representa a dos vehículos fuera del depósito y sin tareas pendientes aparte de las que puedan estar sirviendo en ese momento, en tal caso el solape no produciría ningún cambio. En los casos **b** y **c** el vehículo que está realizando la ruta  $r_1$  asumiría todas las tareas de la ruta  $r_2$ ; como el vehículo que esta última ruta todavía no había sido puesto en servicio, se producirá el ahorro por usar un vehículo menos. El caso **d** es parecido al caso **c** pero con la diferencia que el vehículo de la ruta  $r_2$  sí estaba puesto en servicio; por lo tanto no se producirá el ahorro por el uso de un vehículo menos, y además se deberá contabilizar el gasto de que este vuelva al depósito.

Debido a la existencia de ventanas temporales, además de los costes debido a violaciones de las mismas otra consideración ha de ser tenida en cuenta; puede que la espera entre tareas sea tan elevada que perjudique a la solución propuesta, incrementando el número de vehículos necesarios para realizar la misma. Para minimizar dicho perjuicio, se ha limitado el tiempo de espera máximo entre tareas, MAXWAITING. Dicha restricción se lleva a cabo a través de la imposición de la ecuación (7.2), donde  $W_{ij}$  representa el tiempo de espera entre la última tarea de la ruta  $r_i$  y la primera tarea de la ruta  $r_j$  expresado a través de la ecuación (7.3). La Figura 7.3 muestra gráficamente el tiempo de espera entre tareas.

$$W_{ij} \leq \text{MAXWAITING} \quad (7.2)$$

<sup>2</sup>El Apéndice B recoge un procedimiento matricial para el cálculo de dicha violación de las ventanas

$$W_{ij} = \begin{cases} \text{máx}(0, E_j^O - (st_{il}^D + s_{il}^D + \overline{t_{ilj}^{jf}})) & \text{si } j \in \mathcal{T}^I \\ \text{máx}(0, E_j^D - (st_{il}^D + s_{il}^D + \overline{t_{ilj}^{jf}} + s_{jf}^O + \overline{t_{jf}})) & \text{si } j \in \mathcal{T}^E \end{cases} \quad (7.3)$$

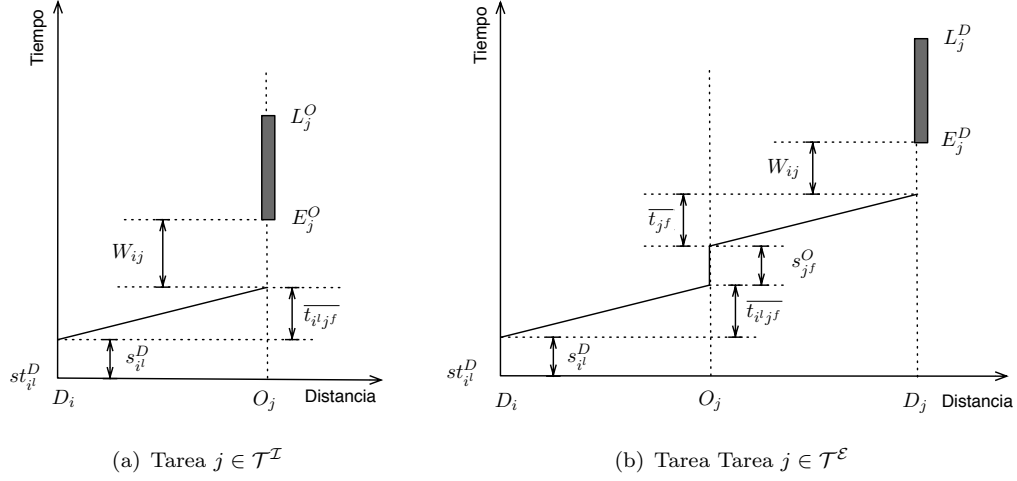


FIGURA 7.3: Tiempo de espera entre dos tareas

La *heurística de ahorro en costes* (SCH) en un entorno dinámico se muestra en el Algoritmo 2. En la línea 2 se llama a la función INITIALROUTES que inicializa las rutas,  $\mathcal{R}$ , según el procedimiento explicado en el ejemplo de la Figura 7.1. Una vez inicializadas las rutas, se entra en el bucle que intentará solapar todas las rutas posibles; en este bucle se iterará mientras haya más rutas que vehículos,  $|\mathcal{R}| \geq |\mathcal{V}|$ , o mientras exista posibilidad de ahorro (como se muestra en la línea 4). Dentro de dicho bucle: se calcula el ahorro de todas las combinaciones de ruta (Línea 7); se analiza qué grupo de dichas uniones,  $\mathcal{WC}$ , cumplen la condición de máximo tiempo de espera (Línea 8); y se elige las rutas a concatenar (Líneas 12, 14 y 16), eligiendo preferentemente las que producen mayor ahorro dentro de las que cumplen la condición de espera. Por último, se realiza la unión llamando a la función MERGINGROUTES (19).

Las Tablas 7.1, 7.2 y 7.3 y la Figura 7.4 muestran cómo se comporta el algoritmo frente a diferentes valores de MAXWAITING. El algoritmo ha sido testado en un problema estático del tipo R1.1<sup>3</sup>, para tres poblaciones de tareas (25, 50, y 100). En las diferentes tablas la primera columna representa el tiempo máximo de espera propuesto; la segunda columna se trata de la distancia recorrida; la tercera columna muestra el número de vehículos necesarios para la solución encontrada; las columnas cuarta y quinta hacen referencia a la ruptura de ventanas temporales en el origen, siendo respectivamente el coste debido a rupturas y el número de rupturas; las columnas sexta y séptima representan lo mismo que las dos anteriores pero para ventanas temporales en el destino; la columna octava sería el coste total de la solución encontrada; y por último,

<sup>3</sup>Ver Apéndice A

**Algoritmo 2** Heurística dinámica de ahorro en costes

---

```

1: procedure SCH( $\mathcal{T}, vstate, tstate, vpos, time, traffic$ )
2:    $\mathcal{R} \leftarrow \text{INITIALROUTES}(\mathcal{T}, vstate)$  ▷  $\mathcal{R}$  conjunto de rutas
3:    $possiblesaving \leftarrow 1$ 
4:   while  $|\mathcal{R}| \geq |\mathcal{V}| \vee possiblesavings$  do
5:     for  $i = 1 : |\mathcal{R}|$  do
6:       for  $j = 1 : |\mathcal{R}|$  do
7:          $sav_{ij} \leftarrow \text{SAV}(\mathcal{R}, \mathcal{T})$  ▷ Ecuación (7.1)
8:          $[W_{ij}, \mathcal{WC}] \leftarrow \text{WAITCOND}(\mathcal{R}, \mathcal{T})$  ▷ Ecuaciones (7.2) y (7.3)
9:       end for
10:    end for
11:    if  $\exists (i, j) \in \mathcal{WC}, i \neq j : sav_{ij} > 0$  then
12:       $\exists (i^*, j^*) \in \mathcal{WC} \mid sav_{i^*, j^*} \geq sav_{ij}, \forall i \neq i^*, j \neq j^*$ 
13:    else if  $\exists i \in \mathcal{R}, j \in \mathcal{R}, i \neq j : sav_{ij} > 0$  then
14:       $\exists i^* \in \mathcal{R}, j^* \in \mathcal{R} \mid sav_{i^*, j^*} \geq sav_{ij}, \forall i \neq i^*, j \neq j^*$ 
15:    else
16:       $\exists i^* \in \mathcal{R}, j^* \in \mathcal{R} \mid sav_{i^*, j^*} \geq sav_{ij}, \forall i \neq i^*, j \neq j^*$ 
17:       $possiblesaving \leftarrow 0$ 
18:    end if
19:     $\mathcal{R} \leftarrow \text{MERGINGROUTES}(\mathcal{R}, i^*, j^*)$  ▷ Unión de rutas
20:  end while
21: end procedure

22: function INITIALROUTES( $\mathcal{T}, vstate$ )
23:    $\mathcal{T}_u = \mathcal{T}_r$  ▷  $\mathcal{T}_u$  Conjunto de tareas no asignadas
24:    $v \leftarrow 1$ 
25:    $i \leftarrow 1$ 
26:   repeat
27:     if  $vstate_v = \text{NODEPOT}$  then
28:        $r_v \leftarrow (f_v^{ini}, f_v^{end}),$ 
29:     else
30:        $r_v \leftarrow (f_v^{ini}, task_i, f_v^{end})$ 
31:        $\mathcal{T}_u \leftarrow \mathcal{T}_u \setminus task_i$ 
32:        $i \leftarrow i + 1$ 
33:     end if
34:      $v \leftarrow v + 1$ 
35:   until  $|\mathcal{T}_u| = \emptyset$ 
36: end function

37: function MERGINGROUTES( $\mathcal{R}, i^*, j^*$ )
38:    $r_{i^*} \leftarrow (f_{r_{i^*}}^{ini}, task_{r_{i^*}}^1, \dots, task_{r_{i^*}}^n, task_{r_{j^*}}^1, \dots, task_{r_{j^*}}^m, f_{r_{i^*}}^{end})$ 
39:    $r_{j^*} \leftarrow (f_{r_{j^*}}^{ini}, f_{r_{j^*}}^{end})$ 
40:   if  $vstate_{v_{r_{j^*}}} = \text{NOUSED}$  then
41:      $\mathcal{R} \leftarrow \mathcal{R} \setminus r_{j^*}$ 
42:   end if
43: end function

```

---



la columna novena mostraría el tiempo de computación en segundos.

Los resultados muestran que imponer un tiempo de espera máximo entre tareas beneficia la búsqueda de soluciones más apropiadas que la libertad total en dicho aspecto. Un límite alrededor de los 65 minutos optimiza los resultados medios alcanzados por el algoritmo en los tres tamaños de población.

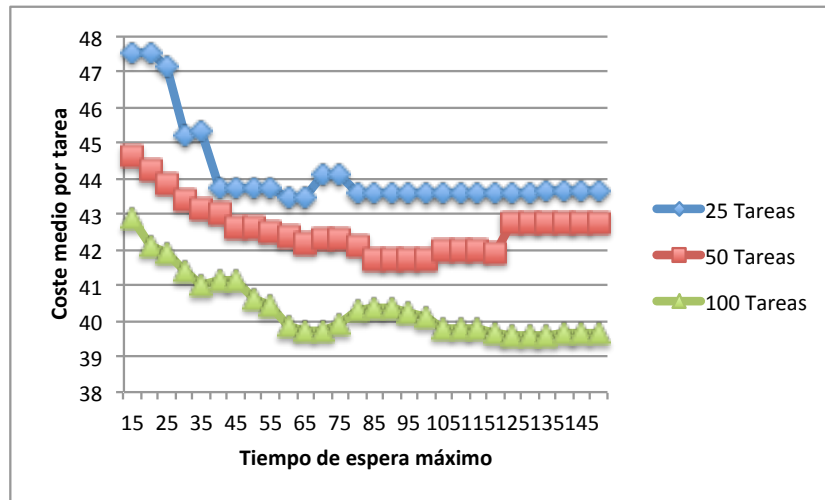


FIGURA 7.4: Heurística de máximo ahorro con tiempo de espera máximo (Test R1.1)

TABLA 7.1: Heurística de máximo ahorro con tiempo de espera máximo - 25 tareas (Test R1.1)

MAXWAITING	dist	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
15	1079,29	10	9,33	2	0	0	1188,62	0,23
20	1079,29	10	9,33	2	0	0	1188,62	0,23
25	1068,04	11	0,50	1	0	0	1178,53	0,23
30	1028,66	10	2,50	1	0	0	1131,16	0,23
35	1024,26	11	0,00	0	0	0	1134,26	0,22
40	990,30	10	2,50	1	0	0	1092,80	0,25
45	990,30	10	2,50	1	0	0	1092,80	0,23
50	990,30	10	2,50	1	0	0	1092,80	0,31
55	990,30	10	2,50	1	0	0	1092,80	0,24
60	984,40	9	12,00	2	0	0	1086,40	0,24
65	984,40	9	12,00	2	0	0	1086,40	0,24
70	990,86	10	12,00	2	0	0	1102,86	0,24
75	990,86	10	12,00	2	0	0	1102,86	0,23
80	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,23
85	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,23
90	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,27
95	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,23
100	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,23
105	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,23
110	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,22
115	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,23
120	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,25
125	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,23
130	978,08	10	12,00	2	0	0	1090,08	0,23
135	978,92	11	3,17	1	0	0	1092,08	0,22
140	978,92	11	3,17	1	0	0	1092,08	0,22
145	978,92	11	3,17	1	0	0	1092,08	0,22
150	978,92	11	3,17	1	0	0	1092,08	0,22

TABLA 7.2: Heurística de máximo ahorro con tiempo de espera máximo - 50 tareas (Test R1.1)

MAXWAITING	dist	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
15	2032,92	20	0,50	1	0	0	2233,42	1,63
20	2011,24	20	0,50	1	0	0	2211,73	1,63
25	1992,33	20	0,00	0	0	0	2192,33	1,63
30	1971,66	20	0,00	0	0	0	2171,66	1,64
35	1958,10	20	0,00	0	0	0	2158,10	1,64
40	1950,01	20	0,00	0	0	0	2150,01	1,64
45	1932,86	20	0,00	0	0	0	2132,86	1,63
50	1928,97	20	4,17	1	0	0	2133,14	1,63
55	1920,22	20	4,17	1	0	0	2124,39	1,63
60	1914,33	20	4,17	1	0	0	2118,49	1,63
65	1905,13	20	4,17	1	0	0	2109,29	1,63
70	1906,21	20	8,94	1	0	0	2115,15	1,63
75	1906,21	20	8,94	1	0	0	2115,15	1,63
80	1896,98	20	8,94	1	0	0	2105,92	1,63
85	1871,42	21	4,17	1	0	0	2085,58	1,61
90	1871,42	21	4,17	1	0	0	2085,58	1,61
95	1871,42	21	4,17	1	0	0	2085,58	1,61
100	1871,42	21	4,17	1	0	0	2085,58	1,62
105	1879,68	21	8,94	1	0	0	2098,63	1,62
110	1879,68	21	8,94	1	0	0	2098,63	1,62
115	1879,68	21	8,94	1	0	0	2098,63	1,62
120	1876,66	22	0,00	0	0	0	2096,66	1,60
125	1916,19	22	3,27	1	0	0	2139,46	1,59
130	1916,19	22	3,27	1	0	0	2139,46	1,60
135	1915,87	22	3,27	1	0	0	2139,14	1,59
140	1915,87	22	3,27	1	0	0	2139,14	1,59
145	1915,87	22	3,27	1	0	0	2139,14	1,59
150	1915,87	22	3,27	1	0	0	2139,14	1,59

TABLA 7.3: Heurística de máximo ahorro con tiempo de espera máximo - 100 tareas (Test R1.1)

MAXWAITING	dist	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
15	3864,47	41	13,83	2	0	0	4288,30	12,66
20	3812,87	38	19,55	3	0	0	4212,43	12,84
25	3795,85	38	19,55	3	0	0	4195,41	12,85
30	3753,23	37	14,22	3	0	0	4137,46	12,86
35	3715,18	37	14,22	3	0	0	4099,40	12,87
40	3722,93	38	9,97	2	0	0	4112,89	12,86
45	3722,93	38	9,97	2	0	0	4112,89	12,82
50	3671,64	38	9,97	2	0	0	4061,61	12,81
55	3652,79	38	12,80	3	0	0	4045,59	12,82
60	3594,42	37	22,30	4	0	0	3986,72	12,85
65	3578,95	36	30,80	5	0	0	3969,75	12,90
70	3578,95	36	30,80	5	0	0	3969,75	12,94
75	3596,06	37	26,97	4	0	0	3993,03	12,88
80	3626,51	38	26,66	4	0	0	4033,18	12,81
85	3627,56	38	26,66	4	0	0	4034,23	12,82
90	3627,56	38	26,66	4	0	0	4034,23	12,80
95	3615,96	38	26,66	4	0	0	4022,62	12,82
100	3601,30	38	26,66	4	0	0	4007,96	12,81
105	3576,63	37	33,83	5	0	0	3980,46	12,91
110	3576,63	37	33,83	5	0	0	3980,46	12,88
115	3576,63	37	33,83	5	0	0	3980,46	12,91
120	3558,86	38	27,50	5	0	0	3966,36	12,86
125	3546,84	38	31,66	6	0	0	3958,51	13,46
130	3546,84	38	31,66	6	0	0	3958,51	13,18
135	3546,84	38	31,66	6	0	0	3958,51	13,18
140	3554,37	38	33,84	6	0	0	3968,21	13,16
145	3554,37	38	33,84	6	0	0	3968,21	12,99
150	3554,37	38	33,84	6	0	0	3968,21	12,82

## 7.2. Heurística de vecino más cercano

La segunda heurística propuesta identifica entre el conjunto de tareas todavía no servidas,  $\mathcal{T}_u$ , la tarea que se encuentra más cerca de las ya insertadas; de ahí que dicha heurística sea nombrada como *heurística del vecino más cercano* (NNH). La cercanía de una tarea  $j$  a una ruta  $r_i$  puede evaluarse a través de la función  $P_{ij}$ , expresada según la ecuación (7.4). Un valor bajo de dicha función es sinónimo de una mayor cercanía.

$$P_{ij} = \delta_1 \cdot d_{ilj} + \delta_2 \cdot W_{ij} + \delta_3 \cdot H_{ij} + \delta_4 \cdot V_{ij}^{\mathcal{I}} + \delta_5 \cdot V_{ij}^{\mathcal{E}} + \delta_6 \cdot uv_i \quad (7.4)$$

Al igual que en la anterior heurística,  $d_{ilj}$  corresponde a la distancia entre el destino de la última tarea de la ruta  $r_i$  y el origen de la tarea  $j$ .

$W_{ij}$  es la espera mínima necesaria para poder comenzar la tarea  $j$  tras terminar la última tarea de la ruta  $r_i$ ; su expresión viene detallada en la ecuación (7.3) y se representa en la Figura 7.3.

$H_{ij}$  es la holgura existente o urgencia en realizar dicha tarea; su valor se toma de la ecuación (7.5), siendo la Figura 7.5 una ayuda para su entendimiento.

$$H_{ij} = \begin{cases} \text{máx}(0, L_j^O - (st_{il}^D + s_{il}^D + \bar{t}_{ilj})) & \text{si tarea } j \in \mathcal{T}^{\mathcal{I}} \\ \text{máx}(0, L_j^D - (st_{il}^D + s_{il}^D + \bar{t}_{ilj} + s_j^O + \bar{t}_j)) & \text{si tarea } j \in \mathcal{T}^{\mathcal{E}} \end{cases} \quad (7.5)$$

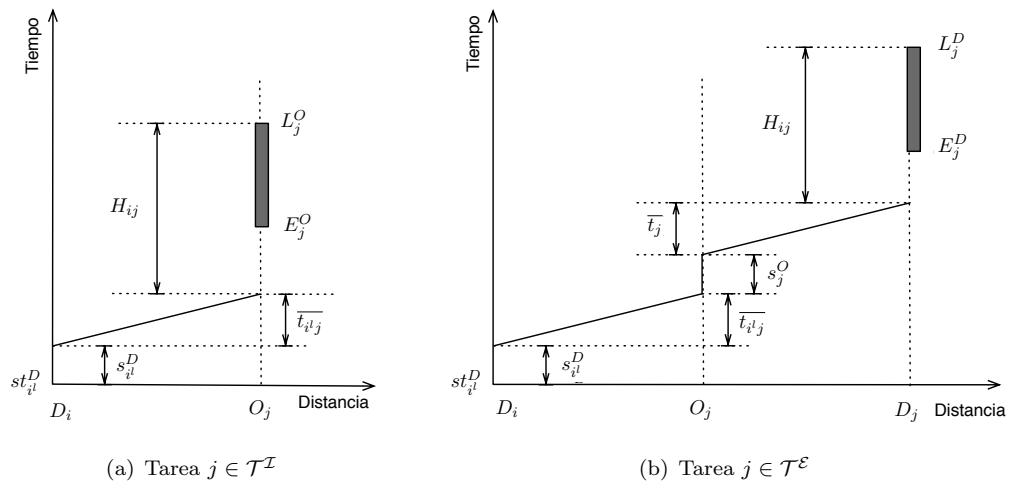


FIGURA 7.5: Holgura entre tareas

$V_{ij}^{\mathcal{I}}$  y  $V_{ij}^{\mathcal{E}}$  son costes debidos a la ruptura de las ventanas temporales, es decir, a la violación de las restricciones temporales contempladas en la terminal. Se realiza

una distinción entre los tareas de importación, (7.6), y de exportación, (7.7), dado que las consecuencias de penalización son diferentes<sup>4</sup>. La función  $sgn$  se trata de la función signo, expresada según la ecuación (7.8)

$$V_{ij}^{\mathcal{I}} = \begin{cases} c_{wait} \cdot \max\left(0, (st_{il}^D + s_{il}^D + \overline{t_{ilj}}) - L_j^O\right) & \text{si } j \in \mathcal{T}^{\mathcal{I}} \\ 0 & \text{si } j \in \mathcal{T}^{\mathcal{E}} \end{cases} \quad (7.6)$$

$$V_{ij}^{\mathcal{E}} = \begin{cases} 0 & \text{si } j \in \mathcal{T}^{\mathcal{I}} \\ c_{miss} \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + sgn\left((st_{il}^D + s_{il}^D + \overline{t_{ilj}} + s_j^O + \overline{t_j}) - L_j^D\right) \right) \right] & \text{si } j \in \mathcal{T}^{\mathcal{E}} \end{cases} \quad (7.7)$$

$$sgn(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ -1 & \text{si } x < 0 \end{cases} \quad (7.8)$$

Por último,  $uv_i$  contiene información sobre el uso previo del vehículo; en caso de que la ruta  $r_i$  no hubiera sido previamente puesta en circulación sería necesario añadir un sobre coste,  $c_{veh}$ .

Dos variaciones del algoritmo han sido testeadas: una variante serie, donde las tareas se van asignando vehículo a vehículo hasta que este no puede admitir más tareas; y otra donde el vecino más cercano se busca para todos los vehículos existentes a la vez, a la cual se le ha llamado solución paralela. En ambos casos, para elegir los parámetros  $\delta$  más adecuados, se han realizados experimentos con el test R1.1 y 3 tamaños de tareas a realizar.

### 7.2.1. Variante serie

En el caso serie, el uso de vehículos se haría de modo secuencial, introduciendo nuevos vehículos en la solución a medida que son necesarios; el valor  $\delta_6$ , que penaliza el uso de nuevos vehículos, no tendría cabida. El uso de un nuevo vehículo se determina cuando no existen más tareas factibles de ser insertadas en la ruta actual. Tres opciones se han estudiado a la hora de determinar cuando una tarea no es factible de añadirse a la ruta en vigor:

- A: Existe ruptura de la ventana temporal en el destino de la tarea, lo que implicaría que se perdería el transporte principal para el caso de tareas de exportación.

---

<sup>4</sup>Por simplificar, las penalizaciones por llegada tardía al depósito han sido equiparadas a tareas de importación

- B: Existe ruptura de la ventana temporal ya sea en el origen o en el destino.
- C: El coste debido a violaciones de las ventanas temporales supera un cierto valor.

El Algoritmo 3 muestra la heurística en su variante serie. Primero inicializa las rutas ya existentes (Líneas 2 a 4), debida a los coches que han sido previamente usados. Después, se analizan el valor de  $P_{ij}$  para cada una de las tareas pendientes de asignar,  $\mathcal{T}_u$ , con la ruta actualmente en vigor (Línea 9), comprobándose si dichas tareas cumplen con la condición de factibilidad (Línea 10); dicha condición será una de las anteriormente comentadas. Mientras existan tareas factibles (Línea 12), se irán insertando al ruta en vigor atendiendo a el valor de  $P_{ij}$  (Líneas 13 y 14). Cuando no existen tareas factibles de ser insertadas en la ruta actual se pasa a la siguiente ruta (Línea 17), generándose una nueva si fuese necesario (Línea 19).

---

**Algoritmo 3** Heurística dinámica de vecino más cercano - serie

---

```

1: procedure SNNH( $\mathcal{T}, vstate, tstate, vpos, time, traffic$ )
2:   for  $v \in \mathcal{UV}$  do                                     ▷ Inicialización de rutas
3:      $r_i \leftarrow (f_{v_i}^{ini}, f_{v_i}^{end}),$ 
4:   end for
5:    $\mathcal{T}_u = \mathcal{T}_r$ 
6:   repeat
7:      $i \leftarrow 1$ 
8:     for  $j \in \mathcal{T}_u$  do
9:        $P_{ij} \leftarrow P(i, j)$ 
10:       $\mathcal{FT} \leftarrow \text{FACTIBLETASK}(r_i, j, \mathcal{T})$            ▷  $\mathcal{FT}$  conjunto de rutas factibles
11:    end for
12:    if  $\exists j \in \mathcal{FT}$  then
13:       $\exists j^* \in \mathcal{FT} \mid P_{i,j^*} \leq P_{ij}, \forall j \neq j^*$ 
14:       $r_i \leftarrow \text{INSERTTASK}(r_i, j^*)$ 
15:       $\mathcal{T}_u \leftarrow \mathcal{T}_u \setminus task_{j^*}$ 
16:    else
17:       $i \leftarrow i + 1$ 
18:      if  $r_i = \emptyset$  then
19:         $r_i \leftarrow (f_{v_i}^{ini}, f_{v_i}^{end}),$ 
20:      end if
21:    end if
22:  until  $|\mathcal{T}_u| = \emptyset$ 
23: end procedure

24: function INSERTTASK( $r_i, j^*$ )
25:    $r_{i*} \leftarrow (f_{v_i}^{ini}, task_{r_i}^1, \dots, task_{r_i}^n, task_{j^*}, f_{v_i}^{end})$ 
26: end function

```

---

La heurística ha sido testeada para diferentes pesos de  $\delta$  en la función  $P_{ij}$  y para las tres posibles condiciones de factibilidad en la inserción de las tareas, las cuales determinan bajo qué circunstancia se añade un nuevo vehículo a la solución. Los resultados se muestra en la Tabla 7.4. En el caso C se consideró un coste máximo por ruptura de ventanas temporales de 10, siendo el mismo determinado a través de un experimento que se muestra en la Figura 7.6. De los experimentos realizados se deduce que el coste máximo de violación permitido debe estar relacionado con el coste de introducir un nuevo vehículo; por eso se obtiene un valor entorno a 10.

Los resultados muestran que el caso C con unos parámetros  $\delta$  que le den mayor peso a la distancia recorrida son los que mejores resultados obtienen. La Tabla 7.5 realiza el estudio del caso C para 3 tamaños de tareas.

TABLA 7.4: Análisis de parámetros y adicción de vehículos en la heurística NNH Serie (Test R1.1 - 100 Tareas)

Infactibilidad	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$	Distancia	Vehículos	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
A	1	1	1	1	1	4247,94	29	581,11	37	0	0	5119,04	0,23
	5	1	1	1	1	4133,64	28	494,37	36	0	0	4908,00	0,24
	10	1	1	1	1	3908,99	29	434,99	35	0	0	4633,98	0,24
	10	3	1	1	1	4019,73	28	471,19	36	0	0	4770,92	0,23
	10	3	3	1	1	4132,77	28	463,60	37	0	0	4876,36	0,23
	10	1	1	3	3	3961,96	29	452,06	32	0	0	4704,02	0,23
	10	3	3	3	3	4135,23	28	458,87	37	0	0	4874,09	0,24
	10	1	1	5	5	3919,41	29	460,91	29	0	0	4670,32	0,24
	10	1	1	5	10	3919,41	29	460,91	29	0	0	4670,32	0,23
	10	1	1	10	10	3951,54	30	462,62	26	0	0	4714,16	0,23
	10	1	1	5	10	3919,41	29	460,91	29	0	0	4670,32	0,24
B	1	1	1	1	1	4260,03	40	0	0	0	0	4660,03	0,26
	5	1	1	1	1	4168,89	42	0	0	0	0	4588,89	0,23
	10	1	1	1	1	4058,79	44	0	0	0	0	4498,79	0,25
	10	3	1	1	1	4102,92	42	0	0	0	0	4522,92	0,27
	10	3	3	1	1	4213,49	41	0	0	0	0	4623,49	0,26
	10	1	1	3	3	4058,79	44	0	0	0	0	4498,79	0,24
	10	3	3	3	3	4213,49	41	0	0	0	0	4623,49	0,24
	10	1	1	5	5	4058,79	44	0	0	0	0	4498,79	0,25
	10	1	1	5	10	4058,79	44	0	0	0	0	4498,79	0,23
	10	1	1	10	10	4058,79	44	0	0	0	0	4498,79	0,23
	10	1	1	5	10	4058,79	44	0	0	0	0	4498,79	0,26
C	1	1	1	1	1	4138,03	33	79,01	31	0	0	4547,04	0,23
	5	1	1	1	1	4003,72	36	82,85	28	0	0	4446,57	0,24
	10	1	1	1	1	3808,04	36	62,62	23	0	0	4230,66	0,23
	10	3	1	1	1	3914,36	35	89,88	28	0	0	4354,24	0,24
	10	3	3	1	1	4041,91	33	92,52	32	0	0	4464,43	0,23
	10	1	1	3	3	3893,36	36	92,99	24	0	0	4346,35	0,24
	10	3	3	3	3	4004,11	34	77,42	30	0	0	4421,53	0,23
	10	1	1	5	5	3808,61	37	54,89	19	0	0	4233,50	0,23
	10	1	1	5	10	3808,61	37	54,89	19	0	0	4233,50	0,23
	10	1	1	10	10	3828,98	37	71,55	19	0	0	4270,53	0,24
	10	1	1	5	10	3808,61	37	54,89	19	0	0	4233,50	0,24

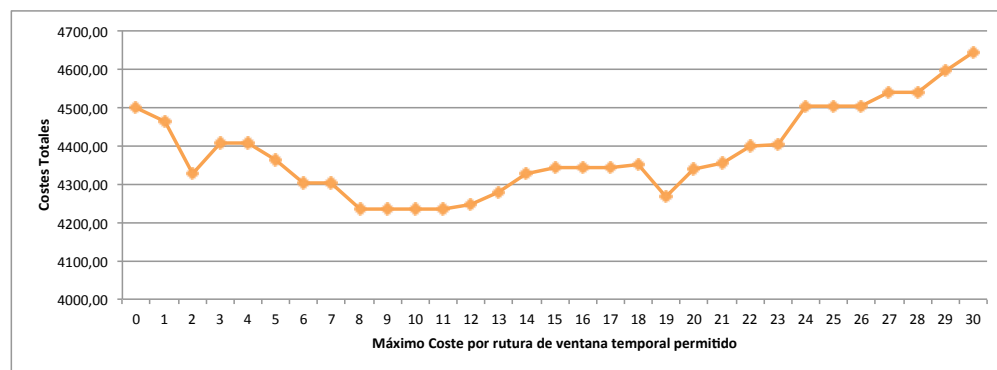


FIGURA 7.6: Variación de los costes totales respecto al coste máximo de ruptura de ventana permitido

TABLA 7.5: Análisis de parámetros en la heurística NNH Serie Tipo C (Test R1.1)

Tareas	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$	Distancia	Vehículos	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
25	1	1	1	1	1	1115,51	11	17,01	7	0	0	1242,52	0,03
	5	1	1	1	1	1048,20	9	19,33	5	0	0	1157,54	0,03
	10	1	1	1	1	1048,20	10	19,33	5	0	0	1167,54	0,03
	10	3	1	1	1	1048,20	9	19,33	5	0	0	1157,54	0,03
	10	3	3	1	1	1055,89	11	14,44	7	0	0	1180,33	0,03
	10	1	1	3	3	1048,20	10	19,33	5	0	0	1167,54	0,03
	10	3	3	3	3	1055,89	11	14,44	7	0	0	1180,33	0,03
	10	1	1	5	5	1048,20	10	19,33	5	0	0	1167,54	0,03
	10	1	1	5	10	1048,20	10	19,33	5	0	0	1167,54	0,03
	10	1	1	10	10	1041,44	10	20,04	5	0	0	1161,47	0,03
50	1	1	1	1	1	2202,54	19	43,54	13	0	0	2436,08	0,07
	5	1	1	1	1	2174,08	18	49,49	11	0	0	2403,57	0,07
	10	1	1	1	1	2184,14	20	40,26	10	0	0	2424,40	0,07
	10	3	1	1	1	2174,08	18	49,49	11	0	0	2403,57	0,07
	10	3	3	1	1	2170,44	19	31,26	13	0	0	2391,70	0,07
	10	1	1	3	3	2169,24	20	44,46	10	0	0	2413,70	0,07
	10	3	3	3	3	2170,44	19	31,26	13	0	0	2391,70	0,07
	10	1	1	5	5	2169,24	20	44,46	10	0	0	2413,70	0,07
	10	1	1	5	10	2169,24	20	44,46	10	0	0	2413,70	0,07
	10	1	1	10	10	2221,42	21	22,13	7	0	0	2453,55	0,07
100	1	1	1	1	1	4138,03	33	79,01	31	0	0	4547,04	0,23
	5	1	1	1	1	4003,72	36	82,85	28	0	0	4446,57	0,24
	10	1	1	1	1	3808,04	36	62,62	23	0	0	4230,66	0,23
	10	3	1	1	1	3914,36	35	89,88	28	0	0	4354,24	0,24
	10	3	3	1	1	4041,91	33	92,52	32	0	0	4464,43	0,23
	10	1	1	3	3	3893,36	36	92,99	24	0	0	4346,35	0,24
	10	3	3	3	3	4004,11	34	77,42	30	0	0	4421,53	0,23
	10	1	1	5	5	3808,61	37	54,89	19	0	0	4233,50	0,23
	10	1	1	5	10	3808,61	37	54,89	19	0	0	4233,50	0,23
	10	1	1	10	10	3828,98	37	71,55	19	0	0	4270,53	0,24
100	1	1	1	5	10	3808,61	37	54,89	19	0	0	4233,50	0,24

### 7.2.2. Variante paralelo

El caso paralelo difiere del anterior en que busca paralelamente el individuo más cercano a algunas de las rutas ya existentes. Se considerará también como ruta existente una ruta vacía, asignada a un vehículo que está en el depósito; de este modo se puede seleccionar como ruta más cercana la creación de una ruta nueva, poner un nuevo vehículo en servicio.

El algoritmo 4 muestra la heurística en su variante paralela. Primero, se inician las rutas ya existentes (Lineas 2 a 4), así como una ruta vacía, que será asignada a un vehículo del depósito. Después, se analiza la función  $P_{ij}$  para todas las combinaciones de rutas y tareas (Línea 9), y se escoge la combinación con un menor valor (Línea 12). La tarea escogida es entonces insertada al final de la ruta seleccionada (Línea 13).

---

**Algoritmo 4** Heurística dinámica de vecino más cercano - serie

---

```

1: procedure PNNH( $\mathcal{T}, vstate, tstate, vpos, time, traffic$ )
2:   for  $|\mathcal{UV}| + 1$  do                                     ▷ Inicialización de rutas
3:      $r_i \leftarrow (f_{v_i}^{ini}, f_{v_i}^{end})$ ,
4:   end for
5:    $\mathcal{T}_u = \mathcal{T}_r$ 
6:   repeat
7:     for  $j \in \mathcal{R}$  do
8:       for  $j \in \mathcal{T}_u$  do
9:          $P_{ij} \leftarrow P(i, j)$ 
10:      end for
11:    end for
12:     $\exists i^* \in \mathcal{R}, j^* \in \mathcal{T}_u \mid P_{i^*, j^*} \leq P_{ij}, \forall i \neq i^*, j \neq j^*$ 
13:     $r_{i^*} \leftarrow \text{INSERTTASK}(r_{i^*}, j^*)$ 
14:     $\mathcal{T}_u \leftarrow \mathcal{T}_u \setminus task_{j^*}$ 
15:  until  $|\mathcal{T}_u| = \emptyset$ 
16: end procedure

```

---

La Tabla 7.6 muestra los resultados para los tres tamaños de población y para diferentes pesos de los parámetros  $\delta$ . Los mejores resultados se alcanzan con  $\delta = [10 \ 1 \ 1 \ 5 \ 10 \ 10]$  para el caso de 25 y 100 tareas, y  $\delta = [10 \ 1 \ 1 \ 5 \ 10 \ 7]$  para el caso de 50 tareas. Los resultados determinan que se le ha de dar un mayor peso a la distancia y a las posibles violaciones de las ventanas temporales.

En este punto es importante señalar que la versión en paralelo de la heurística presenta mejores prestaciones que la versión serie, aunque ve incrementado ligeramente su tiempo de computación.



TABLA 7.6: Análisis parametros de NNH - Paralelo (Test R1.1)

Clientes	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_4$	$\delta_5$	$\delta_6$	Distancia	Vehículos	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
25	1	1	1	1	1	1	1115,51	11	17,01	7	0	0	1242,52	0,04
	5	1	1	1	1	1	1048,20	9	19,33	5	0	0	1157,54	0,04
	10	1	1	1	1	1	1040,38	11	13,57	4	0	0	1163,95	0,03
	10	3	1	1	1	1	1048,20	9	19,33	5	0	0	1157,54	0,04
	10	3	3	1	1	1	1055,89	11	14,44	7	0	0	1180,33	0,04
	10	1	1	3	3	1	1040,38	11	13,57	4	0	0	1163,95	0,04
	10	3	3	3	3	1	1055,89	11	14,44	7	0	0	1180,33	0,04
	10	3	3	3	3	3	1055,89	11	14,44	7	0	0	1180,33	0,04
	10	1	1	5	5	1	1040,38	11	13,57	4	0	0	1163,95	0,04
	10	1	1	5	10	1	1040,38	11	13,57	4	0	0	1163,95	0,04
	10	1	1	10	10	1	1040,38	11	13,57	4	0	0	1163,95	0,04
	10	1	1	5	10	3	1040,38	11	13,57	4	0	0	1163,95	0,04
	10	1	1	5	10	5	1040,38	10	16,04	5	0	0	1156,42	0,04
	10	1	1	5	10	7	998,86	10	17,31	5	0	0	1116,17	0,04
	10	1	1	5	10	10	998,86	10	17,31	5	0	0	1116,17	0,04
50	1	1	1	1	1	1	2202,54	19	43,54	13	0	0	2436,08	0,08
	5	1	1	1	1	1	2174,08	18	49,49	11	0	0	2403,57	0,08
	10	1	1	1	1	1	2074,41	20	41,68	11	0	0	2316,10	0,08
	10	3	1	1	1	1	2133,61	18	49,49	11	0	0	2363,10	0,08
	10	3	3	1	1	1	2170,44	19	31,26	13	0	0	2391,70	0,08
	10	1	1	3	3	1	2124,11	20	36,50	10	0	0	2360,61	0,08
	10	3	3	3	3	1	2170,44	19	31,26	13	0	0	2391,70	0,08
	10	3	3	3	3	3	2170,44	19	31,26	13	0	0	2391,70	0,08
	10	1	1	5	5	1	2124,11	20	36,50	10	0	0	2360,61	0,08
	10	1	1	5	10	1	2124,11	20	36,50	10	0	0	2360,61	0,08
	10	1	1	10	10	1	2162,34	21	18,37	9	0	0	2390,70	0,08
	10	1	1	5	10	3	2013,93	21	39,79	10	0	0	2263,72	0,08
	10	1	1	5	10	5	2077,49	21	34,88	9	0	0	2322,37	0,08
	10	1	1	5	10	7	2024,88	21	39,07	9	0	0	2273,95	0,08
	10	1	1	5	10	10	2024,88	21	39,07	9	0	0	2273,95	0,08
100	1	1	1	1	1	1	4138,03	33	79,01	31	0	0	4547,04	0,26
	5	1	1	1	1	1	4013,07	35	101,60	30	0	0	4464,67	0,26
	10	1	1	1	1	1	3866,80	36	83,68	25	0	0	4310,48	0,27
	10	3	1	1	1	1	3924,89	34	108,72	29	0	0	4373,61	0,26
	10	3	3	1	1	1	4125,14	33	98,02	32	0	0	4553,15	0,26
	10	1	1	3	3	1	3882,03	37	59,03	21	0	0	4311,06	0,27
	10	3	3	3	3	1	4085,49	33	90,82	31	0	0	4506,31	0,26
	10	3	3	3	3	3	4085,49	33	90,82	31	0	0	4506,31	0,29
	10	1	1	5	5	1	3843,80	37	63,41	20	0	0	4277,21	0,29
	10	1	1	5	10	1	3843,80	37	63,41	20	0	0	4277,21	0,26
	10	1	1	10	10	1	3843,80	37	61,75	19	0	0	4275,54	0,26
	10	1	1	5	10	3	3844,48	37	62,06	20	0	0	4276,54	0,26
	10	1	1	5	10	5	3851,59	37	52,89	19	0	0	4274,49	0,27
	10	1	1	5	10	7	3851,59	37	54,06	20	0	0	4275,65	0,26
	10	1	1	5	10	10	3800,30	37	46,32	18	0	0	4216,62	0,26

### 7.3. Heurística de inserción

La *heurística de inserción* (IH) se basa en buscar el mejor lugar, dentro del grupo de rutas existentes,  $\mathcal{R}$ , donde insertar cada una de las tareas pendientes de asignación  $\mathcal{T}_u$ . Para una tarea  $u \in \mathcal{T}_u$  implicaría buscar en qué ruta  $r_v \in \mathcal{R}$  encajaría mejor y en qué orden ha de ser servida la tarea dentro de la misma.

Definida una ruta,  $r_v$ , como  $r_v = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_{m_v}\}$ , donde  $m_v$  es la longitud actual de la ruta, existirá un coste de insertar la tarea  $u$  entre dos tareas de la misma; de forma genérica este coste podrá venir representado por la función (7.9).

$$c_1(r_v, i_p, u, i_{p+1}) \quad (7.9)$$

Para cada ruta  $r_v$  existirá al menos un lugar donde el coste de insertar la tarea  $u$  sea mínimo; dicha posición,  $p_{r_v}^u$ , debe de cumplir la ecuación (7.10).

$$c_1(r_v, i_{p_{r_v}^u}, u, i_{p_{r_v}^u+1}) = \min[c_1(r_v, i_p, u, i_{p+1})], \quad \forall p = 1, \dots, m_v - 1. \quad (7.10)$$

Existirá además una ruta  $r_v^u$  que optimiza la inserción de la tarea  $u$ ; dicha ruta podría encontrarse generalizando la ecuación anterior; como se muestra en la ecuación (7.11).

$$c_1(r_v^u, i_{p_{r_v^u}^u}, u, i_{p_{r_v^u}^u+1}) = \min[c_1(r_v, i_p, u, i_{p+1})], \quad \forall p = 1, \dots, m_v - 1; \forall r_v \in \mathcal{R} \quad (7.11)$$

Una vez determinado cuál es el lugar donde insertar cada una de las tareas pendientes a un menor coste  $c_1$ , el siguiente paso es seleccionar cual de todas las tareas no insertadas,  $u^*$ , debe ser seleccionada para su inserción. Dicha tarea será la tarea que optimice otra función de costes definida como  $c_2(r_v, i_p, u, i_{p+1})$ , como se muestra en la ecuación (7.12)

$$c_2(r_v^{u^*}, i_{p_{r_v^{u^*}}^{u^*}}, u^*, i_{p_{r_v^{u^*}}^{u^*}+1}) = \text{optimum}[c_2(r_v^u, i_{p_{r_v^u}^u}, u, i_{p_{r_v^u}^u+1})], \quad \forall u \in \mathcal{T}_u \quad (7.12)$$

Siguiendo los estudios de Solomon (1987), diferentes funciones  $c_1(r_v, i_p, u, i_{p+1})$  y  $c_2(r_v, i_p, u, i_{p+1})$  ha sido analizadas. En este trabajo se han considerado idénticas ambas funciones aunque se han testado tres opciones diferentes.

- OPCIÓN A: mostrada en la ecuación (7.13), recoge las relaciones del incremento de la distancia recorrida (ecuación (7.14)), el aumento del coste por ruptura de ventanas temporales (ecuación (7.15)) y el uso de nuevos vehículos (ecuación (7.16)).

$$\begin{aligned} c_1^a(r_v, i_p, u, i_{p+1}) &= c_2^a(r_v, i_p, u, i_{p+1}) = \\ &= \alpha_1 \cdot c_{11}(r_v, i_p, u, i_{p+1}) + \alpha_2 \cdot c_{12}(r_v, i_p, u, i_{p+1}) + \alpha_3 \cdot c_{13}(r_v, i_p, u, i_{p+1}) \end{aligned} \quad (7.13)$$

siendo

$$c_{11}(r_v, i_p, u, i_{p+1}) = d_{iu} + d_{uj} - d_{ij} \quad (7.14)$$

$$c_{12}(r_v, i_p, u, i_{p+1}) = \Delta V_{iuj} \quad (7.15)$$

$$c_{13}(r_v, i_p, u, i_{p+1}) = NV_{iuj} \quad (7.16)$$

- OPCIÓN B: además de incluir la ecuación (7.13), incluye un término que trata de minimizar el tiempo de espera entre  $u$  y las tareas entre las que se inserta (ecuación (7.18)). De este modo se busca no acaparar los espacios libres entre tareas colindantes, para así poder insertar otra posteriormente.

$$\begin{aligned} c_1^b(r_v, i_p, u, i_{p+1}) &= c_2^b(r_v, i_p, u, i_{p+1}) = \\ &= c_1^a(r_v, i_p, u, i_{p+1}) + \beta \cdot c_{14}(r_v, i_p, u, i_{p+1}) \end{aligned} \quad (7.17)$$

siendo

$$\begin{aligned} c_{14}(r_v, i_p, u, i_{p+1}) &= \\ &= \min \left( \max(st_u^O - at_u^O, st_u^D - at_u^D), \max(st_{i_{p+1}}^O - at_{i_{p+1}}^O, st_{i_{p+1}}^D - at_{i_{p+1}}^D) \right) \end{aligned} \quad (7.18)$$

- OPCIÓN C: además de incluir la ecuación (7.13) incluye la holgura existente en la tarea insertada (ecuación (7.20)). Se trata de dar prioridad a las tareas que están al límite de no poder cumplir sus restricciones temporales.

$$\begin{aligned} c_1^b(r_v, i_p, u, i_{p+1}) &= c_2^b(r_v, i_p, u, i_{p+1}) = \\ &= c_1^a(r_v, i_p, u, i_{p+1}) + \gamma \cdot c_{15}(r_v, i_p, u, i_{p+1}) \end{aligned} \quad (7.19)$$

siendo

$$c_{15}(r_v, i_p, u, i_{p+1}) = \min(L_u^O - at_u^O, L_u^D - at_u^D) \quad (7.20)$$

Es importante considerar que la inserción de una tarea,  $u$ , en la ruta alterará las previsiones de llegada a las tareas posteriores; por tanto la probabilidad de ruptura de ventanas temporales y el coste esperado debido a violaciones de las mismas podrían verse alterados, de ahí el termino  $c_{12}(r_v, i_p, u, i_{p+1})$ . El calculo de la influencia de la inserción de la tarea  $u$  puede realizarse atendiendo al método matricial expresado en el Apéndice B.

El Algoritmo 7.3 muestra la heurística de inserción de un modo más completo. Primero, se inicializan las rutas existentes (Línea 2) y se añade una ruta extra vacía en el caso de que existan vehículos disponibles (Línea 4). Seguidamente (Línea 8), para cada tarea no insertada  $u$ , se busca a través de la función C1 el mejor lugar donde

podría estar insertada, para luego escoger una de dichas tareas a través de la función C2 (Línea 9). La tarea escogida es insertada en la ruta seleccionada (Linea 10). Si la ruta escogida fuera la ruta vacía inicial se crearía una nueva ruta vacía, siempre que quedarán vehículos libres (Línea 11); de ese modo cada tarea se compara la opción de hacerla en una ruta nueva frente a insertarla en las ya existentes.

**Algoritmo 5** Heurística de inserción

---

```

1: procedure IH( $\mathcal{T}, vstate, tstate, vpos, time, traffic$ )
2:    $r_v \leftarrow (f_v^{ini}, f_v^{end}), \quad \forall v \in \mathcal{UV}$ 
3:   if  $|\mathcal{UV}| < |\mathcal{V}|$  then
4:      $r_{|\mathcal{UV}|+1} \leftarrow (f_{|\mathcal{UV}|+1}^{ini}, f_{|\mathcal{UV}|+1}^{end})$ 
5:   end if
6:    $\mathcal{T}_u \leftarrow \mathcal{T}_r$ 
7:   while  $\mathcal{T}_u \neq \emptyset$  do
8:      $r_u, p_u \leftarrow C1(u) \quad \forall u \in \mathcal{T}_u$ 
9:      $u^*, r_{u^*}, p_{u^*} \leftarrow C2(\mathcal{T}_u)$ 
10:     $r_{u^*} = (f_{u^*}^{ini}, i_{p_{u^*}}, u^*, i_{p_{u^*}+1}, f_{u^*}^{end})$ 
11:    if  $vstate_{r_{u^*}} = \text{NOUSED}$  then
12:       $vstate_{r_{u^*}} \leftarrow \text{USED}$ 
13:      if  $|\mathcal{UV}| < |\mathcal{V}|$  then
14:         $r_{|\mathcal{UV}|+1} \leftarrow (f_{|\mathcal{UV}|+1}^{ini}, f_{|\mathcal{UV}|+1}^{end})$ 
15:         $\mathcal{R} \leftarrow \mathcal{R} \cup r_{|\mathcal{UV}|+1}$ 
16:         $|\mathcal{UV}| \leftarrow |\mathcal{UV}| + 1$ 
17:      end if
18:    end if
19:     $\mathcal{T}_u \leftarrow \mathcal{T}_u / (u^*)$ 
20:  end while
21: end procedure

22: function C1( $u$ )
23:    $bestcost \leftarrow \text{inf}$ 
24:   for  $r_v \in \mathcal{R}$  do
25:     for  $p = 1 : |r_v|$  do
26:        $cost \leftarrow c_1(r_v, i_p, u, i_{p+1})$ 
27:       if  $cost < bestcost$  then
28:          $bestcost \leftarrow cost$ 
29:          $r_u \leftarrow r_v$ 
30:          $p_u \leftarrow p$ 
31:       end if
32:     end for
33:   end for
34: end function

35: function C2( $\mathcal{T}_u$ )
36:    $bestcost \leftarrow \text{inf}$ 
37:   for  $u \in \mathcal{T}_u$  do
38:      $cost \leftarrow c_2(r_u, i_{p_u}, u, i_{p_u+1})$ 
39:     if  $cost < bestcost$  then
40:        $bestcost \leftarrow cost$ 
41:        $u^* \leftarrow u$ 
42:        $r_{u^*} \leftarrow r_u$ 
43:        $p_{u^*} \leftarrow p_u$ 
44:     end if
45:   end for
46: end function

```

---

Como se ha venido haciendo hasta ahora, el algoritmo de inserción ha sido testeado y parametrizado a través de la instancia R1-1. La Tabla 7.7 muestra los resultados para diferentes pesos de  $\alpha$  en la opción A; de ella se puede deducir que es interesante dar un mayor peso al incremento de los costes de violación de las ventanas temporales que a los otros dos términos de la función, y en cualquier caso debiendo ser el peso del incremento de vehículos el menor. Para los pesos de  $\alpha$  que resultaron mas interesantes se simularon las opciones B y C, variando los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$ ; los resultados se muestran en las Tablas 7.8 y 7.9, respectivamente.

Estudiando las simulaciones realizadas en los tres casos es fácil deducir que la opción B es la que mejor se comporta. El peso  $\beta$  del termino  $c_{14}(r_v, i_p, u, i_{p+1})$  ha de ser de un valor bajo, aunque la supresión del mismo empeoraría la solución; este hecho se explica atendiendo al propósito del termino que pondera.  $c_{14}(r_v, i_p, u, i_{p+1})$  trata de evitar que los tiempos de espera existentes entre tareas se repartan de tal modo que perjudiquen a posteriores inserciones; si se analiza la Figura 7.7, el caso **1** inserta la tarea  $u$  de modo que puede impedir insertar alguna tarea extra entre  $i_p$  e  $i_{p+1}$ ; sin embargo si la inserción se realiza como muestran los casos **2** y **3**, puede que se tenga tiempo suficiente para poder realizar otra tarea. Por tanto, se trata de penalizar esto pero de un modo que no eclipse el rendimiento del algoritmo.

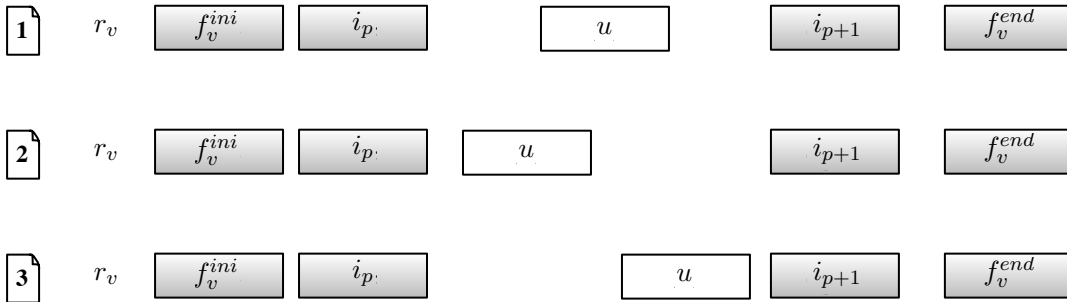


FIGURA 7.7: Desperdicios en la inserción

TABLA 7.7: Análisis parámetros para IH - Caso A (Test R1.1)

Clientes	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	Distancia	Vehículos	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
25	1	1	1	1055,04	10	18,88	3	0	0	1173,92	0,97
	1	1	5	1129,53	8	105,33	7	0	0	1314,86	0,69
	1	1	10	1018,93	7	101,66	7	300	3	1490,58	0,68
	1	5	1	1055,04	10	18,88	3	0	0	1173,92	0,72
	1	10	1	1055,04	10	18,88	3	0	0	1173,92	0,72
	5	1	1	916,00	10	40,14	3	400	4	1456,14	0,71
	5	5	1	1077,04	9	40,46	6	0	0	1207,50	0,71
	5	10	1	1077,04	9	40,46	6	0	0	1207,50	0,72
	10	1	1	910,02	11	15,50	1	500	5	1535,52	0,74
	10	10	1	1077,04	9	40,46	6	0	0	1207,50	0,70
50	1	1	1	2119,81	18	65,04	9	100	1	2464,84	5,11
	1	1	5	2184,41	13	243,71	15	200	2	2758,12	4,90
	1	1	10	2067,96	12	283,52	17	600	6	3071,48	4,82
	1	5	1	2196,20	19	65,04	9	0	0	2451,23	5,05
	1	10	1	2196,20	19	65,04	9	0	0	2451,23	5,09
	5	1	1	1753,81	15	135,76	11	1300	13	3339,57	5,01
	5	5	1	2126,51	19	71,54	10	0	0	2388,04	5,13
	5	10	1	2126,51	19	71,54	10	0	0	2388,04	5,16
	10	1	1	1823,50	16	94,70	9	1300	13	3378,20	5,05
	10	10	1	2126,51	19	71,54	10	0	0	2388,04	5,17
100	1	1	1	4085,14	31	160,04	24	0	0	4555,18	37,52
	1	1	5	3843,09	25	374,62	30	500	5	4967,71	37,00
	1	1	10	3649,32	22	501,55	32	900	9	5270,87	36,59
	1	5	1	4085,14	31	160,04	24	0	0	4555,18	37,67
	1	10	1	4085,14	31	160,04	24	0	0	4555,18	37,70
	5	1	1	3219,45	30	290,82	21	2200	22	6010,26	38,49
	5	5	1	4007,82	33	238,68	26	0	0	4576,50	38,79
	5	10	1	4007,82	33	238,68	26	0	0	4576,50	38,84
	10	1	1	3114,69	28	351,33	23	2500	25	6246,03	38,64
	10	10	1	4004,90	33	239,91	25	0	0	4574,81	45,53

TABLA 7.8: Análisis parámetros para IH - Caso B (Test R1.1)

Clientes	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\beta$	Distancia	Vehículos	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
25	1	1	1	0,01	1055,04	10	18,49	3	0	0	1173,53	0,79
	1	1	1	0,04	1001,84	10	14,08	3	0	0	1115,92	0,71
	1	1	1	0,07	1048,10	9	26,51	5	0	0	1164,61	0,71
	1	1	1	0,10	1121,84	8	77,50	7	0	0	1279,34	0,70
	1	5	1	0,01	1055,04	10	18,49	3	0	0	1173,53	0,71
	1	5	1	0,04	1001,84	10	14,08	3	0	0	1115,92	0,71
	1	5	1	0,07	1048,10	9	26,51	5	0	0	1164,61	0,71
	1	5	1	0,10	1121,84	8	77,50	7	0	0	1279,34	0,70
	1	10	1	0,01	1055,04	10	18,49	3	0	0	1173,53	0,71
	1	10	1	0,04	1001,84	10	14,08	3	0	0	1115,92	0,70
	1	10	1	0,07	1048,10	9	26,51	5	0	0	1164,61	0,75
	1	10	1	0,10	1121,84	8	77,50	7	0	0	1279,34	0,84
	5	10	1	0,01	1077,04	9	40,46	6	0	0	1207,50	0,82
	5	10	1	0,04	1068,44	9	48,17	7	0	0	1206,61	0,78
	5	10	1	0,07	1068,44	9	48,17	7	0	0	1206,61	0,75
	5	10	1	0,10	1068,44	9	48,17	7	0	0	1206,61	0,71
50	1	1	1	0,01	2158,12	18	80,54	9	0	0	2418,66	5,06
	1	1	1	0,04	2232,45	18	54,09	8	100	1	2566,55	5,02
	1	1	1	0,07	2269,57	17	115,30	12	0	0	2554,86	5,02
	1	1	1	0,10	2301,85	17	100,77	14	0	0	2572,62	4,99
	1	5	1	0,01	2158,12	18	80,54	9	0	0	2418,66	5,00
	1	5	1	0,04	2308,84	19	54,09	8	0	0	2552,93	5,04
	1	5	1	0,07	2269,57	17	115,30	12	0	0	2554,86	4,98
	1	5	1	0,10	2301,85	17	100,77	14	0	0	2572,62	5,06
	1	10	1	0,01	2158,12	18	80,54	9	0	0	2418,66	5,11
	1	10	1	0,04	2308,84	19	54,09	8	0	0	2552,93	5,06
	1	10	1	0,07	2269,57	17	115,30	12	0	0	2554,86	5,05
	1	10	1	0,10	2301,85	17	100,77	14	0	0	2572,62	5,01
	5	10	1	0,01	2119,37	19	67,61	7	0	0	2376,97	5,12
	5	10	1	0,04	2176,90	18	87,65	9	0	0	2444,56	5,04
	5	10	1	0,07	2176,90	18	94,15	10	0	0	2451,06	5,01
	5	10	1	0,10	2204,65	18	105,99	10	0	0	2490,64	5,05
100	1	1	1	0,01	4111,29	30	178,28	28	0	0	4589,57	36,74
	1	1	1	0,04	4169,19	30	221,06	26	0	0	4690,25	36,96
	1	1	1	0,07	4169,74	30	185,87	26	0	0	4655,61	37,31
	1	1	1	0,10	4230,95	30	192,99	28	0	0	4723,94	36,61
	1	5	1	0,01	4111,29	30	178,28	28	0	0	4589,57	37,34
	1	5	1	0,04	4169,19	30	221,06	26	0	0	4690,25	37,29
	1	5	1	0,07	4169,74	30	185,87	26	0	0	4655,61	36,68
	1	5	1	0,10	4230,95	30	192,99	28	0	0	4723,94	36,69
	1	10	1	0,01	4111,29	30	178,28	28	0	0	4589,57	37,29
	1	10	1	0,04	4169,19	30	221,06	26	0	0	4690,25	37,47
	1	10	1	0,07	4169,74	30	185,87	26	0	0	4655,61	37,22
	1	10	1	0,10	4230,95	30	192,99	28	0	0	4723,94	37,13
	5	10	1	0,01	3867,54	31	257,77	27	0	0	4435,30	38,10
	5	10	1	0,04	4131,04	31	221,37	28	0	0	4662,41	38,91
	5	10	1	0,07	4152,78	30	273,56	29	0	0	4726,33	37,40
	5	10	1	0,10	4178,78	30	254,73	29	0	0	4733,50	37,26



TABLA 7.9: Análisis parámetros para IH - Caso C (Test R1.1)

Clientes	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\gamma$	Distancia	Vehículos	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
25	1	1	1	1,0E-03	1055,04	10	18,49	3	0	0	1173,53	0,72
	1	1	1	4,0E-03	1111,96	10	23,37	4	0	0	1235,32	0,71
	1	1	1	7,0E-03	1154,69	10	27,14	5	0	0	1281,84	0,71
	1	1	1	1,0E-02	1154,69	10	27,14	5	0	0	1281,84	0,70
	1	5	1	1,0E-03	1055,04	10	18,49	3	0	0	1173,53	0,71
	1	5	1	4,0E-03	1111,96	10	23,37	4	0	0	1235,32	0,71
	1	5	1	7,0E-03	1154,69	10	27,14	5	0	0	1281,84	0,71
	1	5	1	1,0E-02	1154,69	10	27,14	5	0	0	1281,84	0,71
	1	10	1	1,0E-03	1055,04	10	18,49	3	0	0	1173,53	0,72
	1	10	1	4,0E-03	1111,96	10	23,37	4	0	0	1235,32	0,71
	1	10	1	7,0E-03	1154,69	10	27,14	5	0	0	1281,84	0,71
	1	10	1	1,0E-02	1154,69	10	27,14	5	0	0	1281,84	0,71
	5	10	1	1,0E-03	1077,04	9	40,46	6	0	0	1207,50	0,71
	5	10	1	4,0E-03	1077,04	9	40,46	6	0	0	1207,50	0,71
	5	10	1	7,0E-03	1077,04	9	40,46	6	0	0	1207,50	0,72
	5	10	1	1,0E-02	1077,04	9	40,46	6	0	0	1207,50	0,71
50	1	1	1	1,0E-03	2073,04	18	65,40	9	100	1	2418,43	5,02
	1	1	1	4,0E-03	2072,73	18	72,22	10	100	1	2424,95	5,04
	1	1	1	7,0E-03	2072,73	18	72,22	10	100	1	2424,95	5,08
	1	1	1	1,0E-02	2072,73	18	72,22	10	100	1	2424,95	5,05
	1	5	1	1,0E-03	2149,42	19	65,40	9	0	0	2404,82	5,05
	1	5	1	4,0E-03	2149,12	19	72,22	10	0	0	2411,34	5,12
	1	5	1	7,0E-03	2149,12	19	72,22	10	0	0	2411,34	5,13
	1	5	1	1,0E-02	2149,12	19	72,22	10	0	0	2411,34	5,07
	1	10	1	1,0E-03	2149,42	19	65,40	9	0	0	2404,82	5,18
	1	10	1	4,0E-03	2149,12	19	72,22	10	0	0	2411,34	5,13
	1	10	1	7,0E-03	2149,12	19	72,22	10	0	0	2411,34	5,32
	1	10	1	1,0E-02	2149,12	19	72,22	10	0	0	2411,34	5,54
	5	10	1	1,0E-03	2160,00	19	61,86	9	0	0	2411,87	5,42
	5	10	1	4,0E-03	2160,00	19	61,86	9	0	0	2411,87	5,34
	5	10	1	7,0E-03	2124,14	20	55,08	8	0	0	2379,22	5,34
	5	10	1	1,0E-02	2137,92	19	71,15	9	0	0	2399,07	5,29
100	1	1	1	1,0E-03	4085,14	30	174,08	25	0	0	4559,23	37,61
	1	1	1	4,0E-03	4018,14	31	159,68	26	100	1	4587,82	37,67
	1	1	1	7,0E-03	4018,14	31	153,53	26	100	1	4581,67	37,33
	1	1	1	1,0E-02	4020,62	31	149,43	26	100	1	4580,04	37,58
	1	5	1	1,0E-03	4085,14	30	174,08	25	0	0	4559,23	38,05
	1	5	1	4,0E-03	4094,53	31	167,24	27	0	0	4571,77	37,95
	1	5	1	7,0E-03	4094,53	31	168,42	27	0	0	4572,95	40,62
	1	5	1	1,0E-02	4097,01	32	149,43	26	0	0	4566,43	39,31
	1	10	1	1,0E-03	4085,14	30	174,08	25	0	0	4559,23	42,95
	1	10	1	4,0E-03	4094,53	31	167,24	27	0	0	4571,77	46,80
	1	10	1	7,0E-03	4094,53	31	168,42	27	0	0	4572,95	39,22
	1	10	1	1,0E-02	4097,01	32	149,43	26	0	0	4566,43	37,68
	5	10	1	1,0E-03	4065,49	33	226,71	24	0	0	4622,19	38,71
	5	10	1	4,0E-03	4065,49	33	226,71	24	0	0	4622,19	39,31
	5	10	1	7,0E-03	4044,56	33	186,93	23	0	0	4561,49	40,09
	5	10	1	1,0E-02	4065,59	33	177,05	22	0	0	4572,64	38,39

## 7.4. Heurística de inserción en dos fases

La *heurística de inserción en dos fases* (I2PH) propuesta por [Caris y Janssens \(2009\)](#) ha sido adaptada para el problema dinámico propuesto en esta tesis.

Este procedimiento heurístico está basado en el ahorro de costes a través de la unión de tareas simples de importación y exportación. El principio es sencillo; si una tarea es completada individualmente, el 50 % del viaje será empleado en movimientos en vacío, como muestra la figura 7.8a. Sin embargo, la adecuada combinación de tareas de importación y exportación podría permitirnos un ahorro significativo en la distancia total del viaje, como se muestra en la Figura 7.8b. Dado que en el problema bajo estudio la asignación de tareas a vehículos es dinámica, los vehículos podrían encontrarse en cualquier lugar. Como ya se ha comentado en varias ocasiones esta problemática ha sido resuelta con la inclusión de tareas ficticias, que aúnan información sobre la situación del vehículo y, si fuera pertinente, sobre la tarea que en ese momento esté realizando. En el caso de unión de tareas donde estén involucradas tareas ficticias no todos los casos producen ahorro. En la Figura 7.8c se analizan tres situaciones diferentes: el primer caso muestra la unión de una tarea ficticia, que representa un vehículo que está en proceso de realizar una tarea de importación con una tarea de exportación; el segundo caso muestra la unión la tarea ficticia de un vehículo que no está rindiendo ninguna tarea con una tarea de importación; y el tercer caso muestra la unión de una tarea ficticia de un vehículo, que se encuentra en la misma situación que el del caso segundo, con una tarea de exportación. Observando dicha figura se puede concluir que en la unión de tareas ficticias con otras tareas el ahorro sólo se alcanzará si se unen con tareas de exportación.

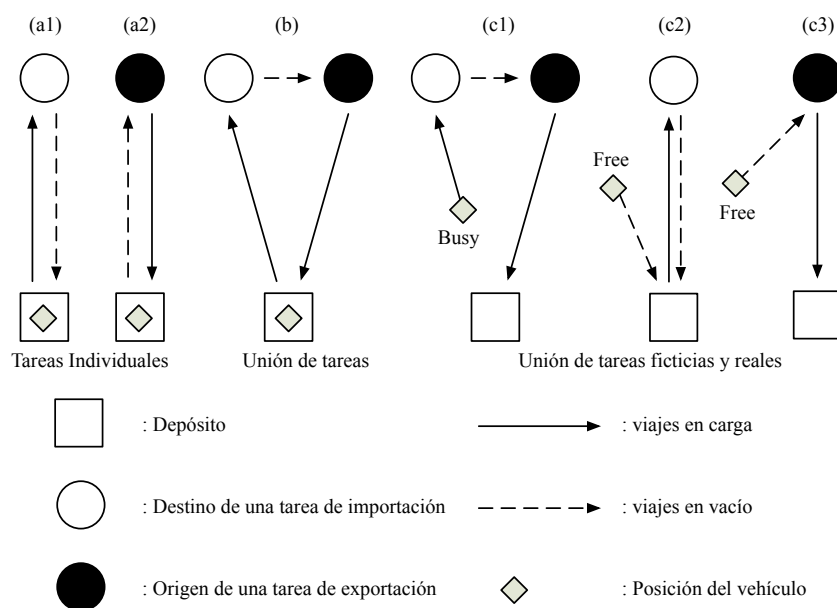


FIGURA 7.8: Unión de tareas simples

Como su propio nombre indica, la heurística está dividida en dos fases. En una primera fase, todas las combinaciones posibles entre tareas, incluyendo las ficticias, son analizadas, y las mejores combinaciones son seleccionadas. En una segunda fase, las tareas combinadas son insertadas dentro de rutas.

Siguiendo el pseudocódigo 6, la primera fase estaría desglosada en las funciones: FEASIBILITYMERGEDTASKS (Línea 2), que analiza el conjunto de tareas viables a la hora de unir las,  $\mathcal{P}$ ; EVALUATION (Línea 3), que evalúa el ahorro de cada una de las uniones posibles; y SELECTION (Línea 4), que selecciona los pares que cubrirán todas las tareas a realizar,  $\mathcal{S}$ , tratando de maximizar el ahorro. La segunda fase sería la función CONSTRUCTION (Línea 6), que iría insertando en rutas las tareas seleccionadas. La función DESCRIPTION (Línea 5) simplemente analiza una serie de características de los pares seleccionados para tener la información necesaria a la hora de construir la ruta.

Los siguientes epígrafes explicarán con mayor detalle cada una de estas funciones.

---

**Algoritmo 6** Heurística de inserción en dos fases

---

```

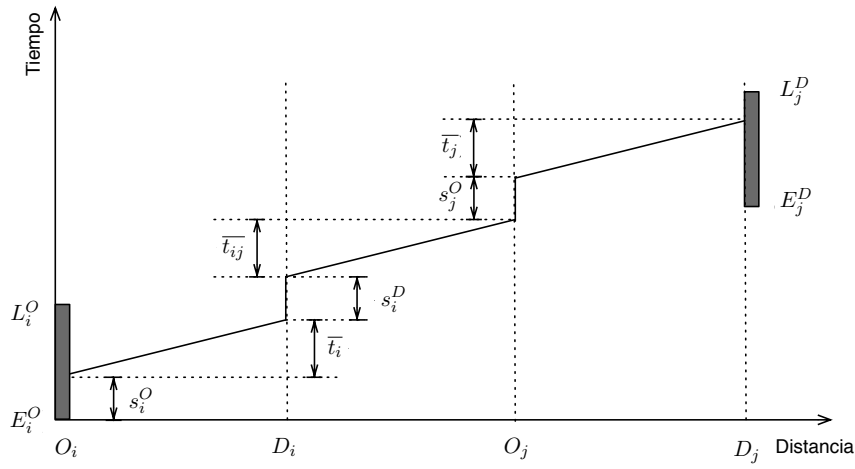
1: procedure I2PH( $\mathcal{T}, vstate, tstate, vpos, time, traffic$ )
2:    $\mathcal{P} \leftarrow$  FEASIBILITYMERGEDTASKS( $time, \mathcal{T}$ )
3:    $sav_{p_{ij}} \leftarrow$  EVALUATION( $p_{ij}$ )  $\forall p_{ij} \in \mathcal{P}$ 
4:    $\mathcal{S} \leftarrow$  SELECTION( $\mathcal{P}, sav_{p_{ij}}$ )
5:    $E_{ij}, L_{ij}, RS_{ij} \leftarrow$  DESCRIPTION( $p_{ij}$ )  $\forall p_{ij} \in \mathcal{S}$ 
6:    $\mathcal{R} \leftarrow$  CONSTRUCTION( $\mathcal{S}, E_{ij}, L_{ij}, RS_{ij}$ )
7: end procedure
```

---

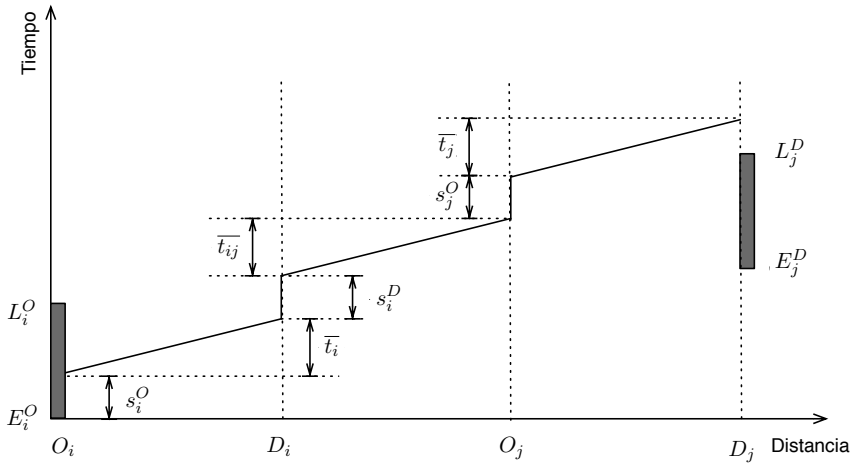
#### 7.4.1. Emparejamiento de tareas simples

Como se muestra en la Figura 7.8, la combinación de dos tareas simples en una más compleja podría suponer un gran ahorro en costes. Estos pares de tareas estarán formados por una tarea perteneciente al grupo de tareas ficticias de inicio o tareas de importación,  $i \in \mathcal{T}^I \cup \mathcal{T}_f^{ini}$ , y otra tarea perteneciente al grupo de tareas de exportación o tareas ficticias de finalización,  $j \in \mathcal{T}^E \cup \mathcal{T}_f^{end}$ . Cualquier otra combinación de tareas no supondría ahorro alguno.

Pero no todos los pares de tareas  $(i, j)$ , formados por una tarea de cada uno de los grupos descritos anteriormente, pueden ser combinados en tareas complejas factibles. Por un lado, debido a la existencia de ventanas temporales, es imprescindible que las restricciones temporales de la segunda tarea permitan realizarla después de ejecutar la primera. La segunda tarea,  $j$ , debe poder realizarse después de realizar la primera tarea del par,  $i$ , teniendo en cuenta el tiempo que se tarda en llegar a ella. Observando la Figura 7.9, el caso *a* es viable, dado que el par de tareas  $(i, j)$  pueden servirse consecutivamente, sin embargo, en el caso *b* es imposible llegar a tiempo a la segunda tarea del par.



(a) Caso viable



(b) Caso no viable

FIGURA 7.9: Viabilidad de unión de tareas atendiendo a las restricciones temporales

Por otro lado, el tiempo máximo de espera entre tareas ha sido limitado por motivos de eficiencia. Cualquier par cuyo tiempo mínimo de espera entre tareas sea mayor que un valor dado será descartado a priori. Este límite temporal ha sido introducido debido a la ineficiencia de largos tiempos de espera entre tareas; si un vehículo debe esperar demasiado tiempo entre la realización de una tarea y la siguiente, este estará desperdiciando tiempo de su día de trabajo, incrementando la necesidad de más vehículos en la flota.

$$\text{máx}(\text{time}, E_i^O) + s_i^O + \bar{t}_i + s_i^D + \bar{t}_{ij} + s_j^O + \bar{t}_j \leq L_i^D \quad (7.21)$$

$$\text{MINWAIT}_{ij} \leq \text{MAXWAIT} \quad (7.22)$$

$$\text{MINWAIT}_{ij} = \text{máx}(0, E_j^D - (\text{máx}(\text{time}, L_i^O) + s_i^O + \bar{t}_i + s_i^D + \bar{t}_{ij} + s_j^O + \bar{t}_j)) \quad (7.23)$$

Estas dos restricciones se consiguen imponiendo el cumplimiento de las ecuaciones 7.21, relativa a las restricciones debido a las ventanas temporales, y 7.22, relativa al máximo tiempo de espera. En la ecuación 7.21 se fuerza que un vehículo que sale de la tarea  $i$  lo más temprano posible pueda alcanzar la tarea  $j$  antes del cierre de su ventana temporal. En la ecuación 7.22, se fuerza que el mínimo tiempo posible de espera entre las dos tareas del par  $(i, j)$ ,  $\text{MINWAIT}_{ij}$ , sea menor que un tiempo máximo permitido,  $\text{MAXWAIT}$ .  $\text{MINWAIT}_{ij}$  se define según la ecuación 7.23, y simboliza el tiempo que tiene que esperar un vehículo que sale de la tarea  $i$  lo más tarde posible antes de poder comenzar a realizar la tarea  $j$  (ver Figura 7.10).

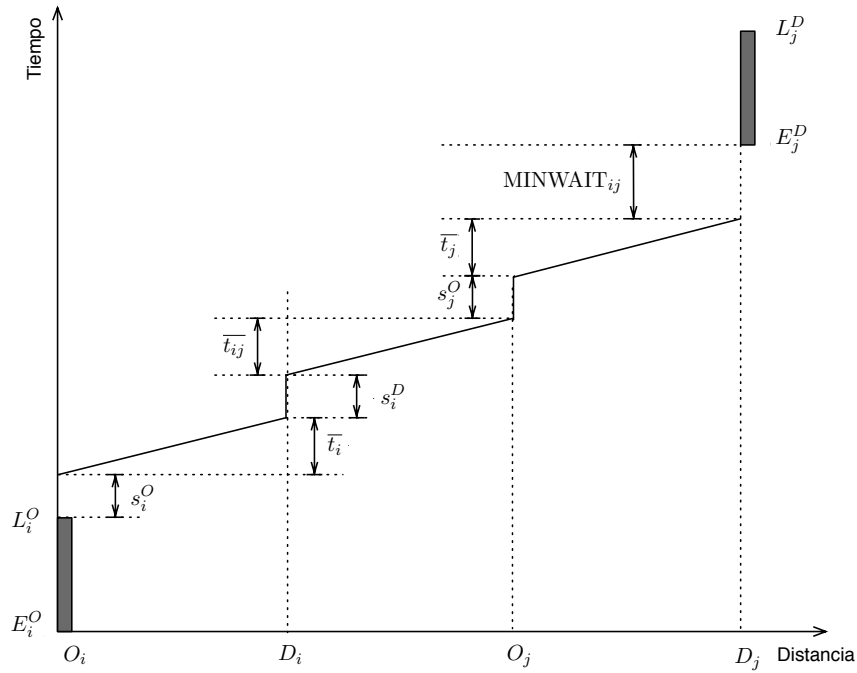


FIGURA 7.10: Tiempo de espera mínimo en la unión de tareas

Una vez que los pares de tareas viables son identificadas, estos son ordenados atendiendo al ahorro en el tiempo esperado para su ejecución. El ahorro se expresa según la ecuación 7.24, que contabiliza la diferencia entre realizar las tareas por separado y realizarlas conjuntamente.

$$\bar{t}_i + \bar{t}_j - \bar{t}_{ij}. \quad (7.24)$$

Caris y Janssens (2009) usan el ahorro en el tiempo de viaje. Este trabajo ha elegido el ahorro en el tiempo esperado ya que el tiempo de viaje tiene un factor aleatorio en el problema que se resuelve, y por lo tanto no dependerá en valor absoluto de un correcto algoritmo, sino de las circunstancias del entorno. Otra posibilidad era usar la distancia recorrida pero eso ocasionaría que se valorarían positivamente rutas que ahorran mucha distancia, incluso a sabiendas de la posibilidad de grandes niveles de congestión en la zona.

Cada uno de estos pares tiene definidos un tiempo de inicio más temprano,  $E_{ij}$ , un tiempo de inicio más tardío,  $L_{ij}$ , y un tiempo de ejecución del par  $RS_{ij}$ .

El tiempo de inicio más temprano  $E_{ij}$  es definido como el instante más temprano en el que puede comenzarse a completar el par  $(i, j)$  sin tiempo de espera innecesario entre las tareas  $i$  y  $j$ ; su valor puede conocerse a través de la ecuación 7.25, sirviendo la Figura 7.11 de apoyo a su entendimiento.

$$E_{ij} = \begin{cases} L_i^O & \text{si } E^* > L_i^O \\ E^* & \text{si } E_j^O \leq E^* \leq L_i^O \\ E_i^O & \text{si } E^* \leq E_i^O \end{cases} \quad (7.25)$$

siendo

$$E^* = E_j^D - s_i^O - \bar{t}_i - s_i^D - \bar{t}_{ij} - s_j^O - \bar{t}_j \quad (7.26)$$

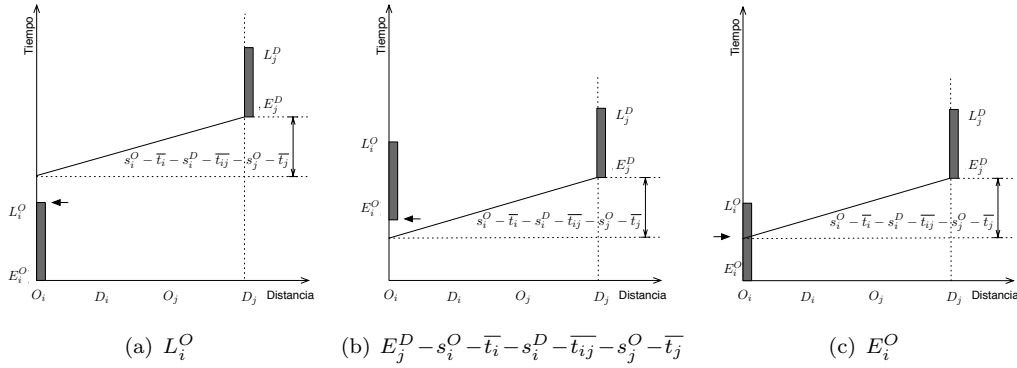


FIGURA 7.11: Tiempo de inicio más temprano de un par  $(i, j)$

El tiempo de inicio más tardío,  $L_{ij}$ , será definido como el último instante en que pueden empezar a completarse los pares  $(i, j)$  de modo que si el par se empieza a llevar a cabo más tarde entonces ambas tareas no podrán ser realizadas a tiempo; su valor viene expresado en la ecuación 7.27.

$$L_{ij} = \min(L_i^O, L_j^D - s_i^O - \bar{t}_i - s_i^D - \bar{t}_{ij} - s_j^O - \bar{t}_j) \quad (7.27)$$

El tiempo necesario para completar las tareas pertenecientes a un par,  $RS_{ij}$  es la suma de los tiempos de viaje, tiempos de servicio y del mínimo tiempo de espera entre las dos tareas del par (ver ecuación 7.28). Para esta evaluación se usan los tiempos de los viajes esperados.

$$RS_{ij} = s_i^O + \bar{t}_i + s_i^D + \bar{t}_{ij} + s_j^O + \bar{t}_j + s_j^D + MINWAIT_{ij} \quad (7.28)$$

El Algoritmo 7 recoge las distintas funciones que se realizan en la primera fase

de la heurística. Dichas funciones hacen uso de las diferentes ecuaciones mostradas a lo largo del epígrafe.

---

**Algoritmo 7** Heurística dinámica de inserción en dos fases - 1ª Fase
 

---

```

1: function FEASIBILITYMERGEDTASKS( $time, \mathcal{T}$ )
2:    $\mathcal{P} \leftarrow \emptyset$ 
3:   for  $i \in \mathcal{T}_f^{ini} \cup \mathcal{T}_r^{\mathcal{I}}$  do
4:     for  $j \in \mathcal{T}_f^{end} \cup \mathcal{T}_r^{\mathcal{E}}$  do
5:       if Eq. 7.21  $\wedge$  Eq. 7.22 then
6:          $\mathcal{P} \leftarrow p_{ij}$ 
7:       end if
8:     end for
9:   end for
10: end function

11: function EVALUATION( $p_{ij}$ )
12:    $sav_{p_{ij}} \leftarrow$  Eq. 7.24
13: end function

14: function SELECTION( $\mathcal{P}, sav_{p_{ij}}$ )
15:    $\mathcal{S} \neq \emptyset$ 
16:   while  $\mathcal{P} \neq \emptyset$  do
17:      $\exists i^* \in \mathcal{T}, j^* \in \mathcal{T} \mid sav_{p_{i^*j^*}} \geq sav_{p_{ij}}, \quad \forall i \neq i^*, j \neq j^*$ 
18:      $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup p_{i^*j^*}$ 
19:      $\mathcal{P} \leftarrow \mathcal{P} / p_{i^*j^*} \quad \forall j \in \mathcal{T}$ 
20:      $\mathcal{P} \leftarrow \mathcal{P} / p_{i^*j^*} \quad \forall i \in \mathcal{T}$ 
21:   end while
22: end function

23: function DESCRIPTION( $p_{ij}$ )
24:    $E_{ij} \leftarrow$  Eq. 7.25
25:    $L_{ij} \leftarrow$  Eq. 7.27
26:    $RS_{ij} \leftarrow$  Eq. 7.28
27: end function

```

---

#### 7.4.2. Construcción de rutas

Para cada vehículo se creará una ruta, insertando en las mismas los pares seleccionados anteriormente. Cada ruta estará compuesta al menos por dos pares, uno que contiene la tarea ficticia de inicio y otro que contiene la tarea ficticia de fin. El resto de pares se irán insertando secuencialmente en las rutas, ordenando los mismos de forma creciente según su tiempo de inicio más tardío,  $L_{ij}$ . Cada par será insertado en la primera ruta posible de las usadas, o si no es posible, en la ruta cuyo vehículo suponga un menor coste de puesta en funcionamiento.

Un par de tareas podrá ser insertado dentro de la ruta del vehículo  $v \in \mathcal{V}$  si dos condiciones se cumplen: la primera condición es que el vehículo  $v$  debe ser capaz de

comenzar a realizar el par de tareas  $(i, j)$  antes de  $L_{ij}$ , y la segunda condición establece que el vehículo  $v$  debe poder retornar al depósito antes de la finalización de la ventana temporal del mismo.

Para poder determinar el cumplimiento de estas dos condiciones una nueva variable ha sido definida,  $RS_v$ , que se trata del tiempo de servicio de la ruta del vehículo  $v$ . Al principio, cuando ningún par ha sido insertado dentro de la ruta  $RS_v = 0$ . El cumplimiento de la primera condición conlleva el cumplimiento de la ecuación (7.29), mientras que el cumplimiento de la segunda condición se determina a través de la ecuación (7.30), siendo  $T_v$  el momento más tardío posible de llegada del vehículo al depósito.

$$\text{máx}(\text{time}, RS_v) \leq L_{ij} \quad (7.29)$$

$$\text{máx}(\text{time}, RS_v, E_{ij}) + RS_{ij} \leq T_v \quad (7.30)$$

Cuando un par cumple las condiciones definidas por las ecuaciones (7.29) y (7.30) para poder ser insertada dentro de la ruta de un vehículo  $v$ , es insertado y el tiempo de servicio de la ruta es actualizado según la ecuación (7.31). Los primeros vehículos donde se intentará insertar pares de tareas serán los vehículos que ya han sido previamente usados, USEDVEH, y en caso de no ser posible un nuevo vehículo será puesto en uso.

$$RS_v \leftarrow \text{máx}(\text{time}, RS_v, E_{ij}) + RS_{ij} \quad (7.31)$$

Es posible que algún par no pueda ser servido a tiempo, incluso usando vehículos que se encuentran en el depósito, en cuyo caso el par será asignado al vehículo que pueda llegar a comenzar con el menor retraso posible.

Si después de generar las rutas algún vehículo sólo contiene tareas ficticias y además su  $RS_v$  es igual a cero, significa que la ruta no es realmente usada y el vehículo permanece en el depósito. Por otra parte, si la ruta está compuesta sólo por tareas ficticias pero, sin embargo,  $RS_v$  no es 0, entonces el vehículo está llevando a cabo en ese momento una tarea, pero no tiene ninguna más asignada, por lo que volverá al depósito después de realizarla; o puede incluso que simplemente se encuentre de vuelta al depósito. Estos casos pueden darse debido a que lo que se está optimizando es un *snapshot*, una instantánea, de la situación en tiempo real de las tareas y los vehículos.

El Algoritmo 8 muestra la fase de construcción de la heurística de forma detallada.



**Algoritmo 8** Heurística dinámica de inserción en dos fases - 2ª Fase

---

```

1: function CONSTRUCTION( $\mathcal{S}, E_{ij}, L_{ij}, RS_{ij}$ )
2:    $r_v \leftarrow \{p_{f_v^{ini}j}, p_{if_v^{end}}\} \quad \forall v \in \mathcal{V} : p_{f_v^{ini}j} \wedge p_{if_v^{end}} \in \mathcal{S}$ 
3:    $\mathcal{R} \leftarrow \mathcal{R} \cup r_v \quad \forall v \in \mathcal{UV}$ 
4:    $r_{|\mathcal{V}|+1} \leftarrow \{f_{|\mathcal{V}|+1}^{ini}, f_{|\mathcal{V}|+1}^{end}\}$ 
5:    $\mathcal{R} \leftarrow \mathcal{R} \cup r_{|\mathcal{V}|+1}$ 
6:    $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} / p_{f_v^{ini}j} \quad \forall v \in \mathcal{UV}$ 
7:    $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} / p_{if_v^{end}} \quad \forall v \in \mathcal{UV}$ 
8:   while  $\mathcal{S} \neq \emptyset$  do
9:      $\exists p_{i^*j^*} \in \mathcal{S} \mid L_{i^*j^*} \leq L_{ij}, \quad \forall i \neq i^*, j \neq j^*$ 
10:     $v \leftarrow 0$ 
11:    repeat
12:       $v \leftarrow v + 1$ 
13:       $cond1 \leftarrow \text{Eq. 7.29}$ 
14:       $cond2 \leftarrow \text{Eq. 7.30}$ 
15:    until  $cond1 \wedge cond2$ 
16:     $r_v \leftarrow \{p_{f_v^{ini}j}, \dots, p_{i^*j^*}, p_{if_v^{end}}\}$ 
17:    if  $vstate_v = \text{NOUSED}$  then
18:       $vstate_v = \text{USED}$ 
19:       $r_{|\mathcal{V}|+1} \leftarrow \{f_{|\mathcal{V}|+1}^{ini}, f_{|\mathcal{V}|+1}^{end}\}$ 
20:       $\mathcal{R} \leftarrow \mathcal{R} \cup r_{|\mathcal{V}|+1}$ 
21:    end if
22:     $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} / p_{i^*j^*}$ 
23:  end while
24: end function

```

---

▷ Para  $p_{i^*j^*}$  y  $r_v$ 

Se ha simulado la heurística para la instancia R1.1 para diferentes MAXWAITING siendo los resultados los mostrados en la Figura 7.12 y las Tablas 7.10, 7.11, y 7.12 (25, 50 y 100 tareas respectivamente). Exigir un tiempo de espera máximo alrededor de los 45 minutos minimiza los costes.

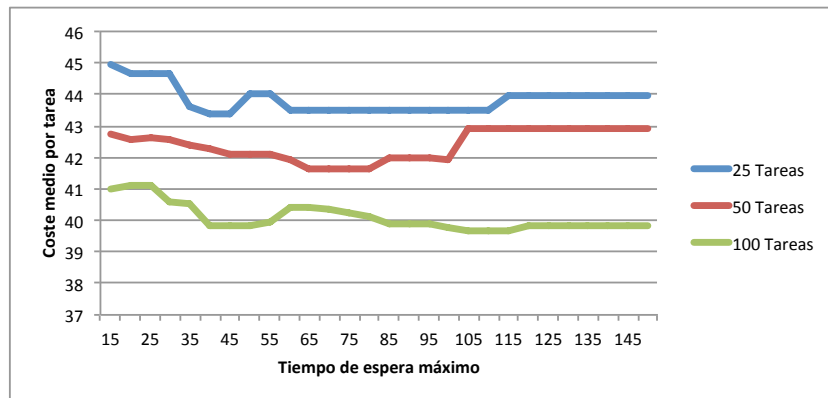


FIGURA 7.12: Heurística I2PH con tiempo de espera máximo (Test R1.1)

TABLA 7.10: Análisis del MAXWAITING en la heurística I2PH (Test R1.1 - 25 Tareas)

MAXWAITING	Dist	nVeh	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
15	1024,26	10	0	0	0	0	1124,26	0,22
20	1016,18	10	0	0	0	0	1116,18	0,04
25	1016,18	10	0	0	0	0	1116,18	0,03
30	1016,18	10	0	0	0	0	1116,18	0,04
35	990,30	10	0	0	0	0	1090,30	0,03
40	984,40	10	0	0	0	0	1084,40	0,03
45	984,40	10	0	0	0	0	1084,40	0,03
50	990,86	11	0	0	0	0	1100,86	0,03
55	990,86	11	0	0	0	0	1100,86	0,04
60	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,03
65	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,03
70	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,04
75	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,04
80	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,05
85	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,03
90	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,04
95	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,04
100	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,03
105	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,04
110	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,03
115	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,04
120	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,03
125	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,03
130	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,03
135	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,03
140	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,03
145	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,03
150	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,03

TABLA 7.11: Análisis del MAXWAITING en la heurística I2PH (Test R1.1 - 50 Tareas)

MAXWAITING	Dist	nVeh	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
15	1936,11	20	0	0	0	0	2136,11	0,06
20	1928,03	20	0	0	0	0	2128,03	0,06
25	1932,49	20	0	0	0	0	2132,49	0,06
30	1928,97	20	0	0	0	0	2128,97	0,06
35	1920,22	20	0	0	0	0	2120,22	0,06
40	1914,33	20	0	0	0	0	2114,33	0,06
45	1905,13	20	0	0	0	0	2105,13	0,06
50	1906,21	20	0	0	0	0	2106,21	0,06
55	1906,21	20	0	0	0	0	2106,21	0,07
60	1896,98	20	0	0	0	0	2096,98	0,07
65	1871,42	21	0	0	0	0	2081,42	0,06
70	1871,42	21	0	0	0	0	2081,42	0,06
75	1871,42	21	0	0	0	0	2081,42	0,06
80	1871,42	21	0	0	0	0	2081,42	0,07
85	1879,68	22	0	0	0	0	2099,68	0,09
90	1879,68	22	0	0	0	0	2099,68	0,06
95	1879,68	22	0	0	0	0	2099,68	0,06
100	1876,66	22	0	0	0	0	2096,66	0,06
105	1916,19	23	0	0	0	0	2146,19	0,06
110	1916,19	23	0	0	0	0	2146,19	0,07
115	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,06
120	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,06
125	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,06
130	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,06
135	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,06
140	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,06
145	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,06
150	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,06

TABLA 7.12: Análisis del MAXWAITING en la heurística I2PH (Test R1.1 - 100 Tareas)

MAXWAITING	Dist	nVeh	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
15	3709,68	39	0	0	0	0	4099,68	0,17
20	3722,93	39	0	0	0	0	4112,93	0,15
25	3722,93	39	0	0	0	0	4112,93	0,14
30	3671,64	39	0	0	0	0	4061,64	0,13
35	3652,79	40	0	0	0	0	4052,79	0,13
40	3585,27	40	0	0	0	0	3985,27	0,15
45	3584,44	40	0	0	0	0	3984,44	0,14
50	3584,44	40	0	0	0	0	3984,44	0,13
55	3596,06	40	0	0	0	0	3996,06	0,15
60	3630,98	41	0	0	0	0	4040,98	0,16
65	3632,04	41	0	0	0	0	4042,04	0,16
70	3627,56	41	0	0	0	0	4037,56	0,15
75	3615,96	41	0	0	0	0	4025,96	0,14
80	3601,30	41	0	0	0	0	4011,30	0,15
85	3576,63	41	0	0	0	0	3986,63	0,17
90	3576,63	41	0	0	0	0	3986,63	0,15
95	3576,63	41	0	0	0	0	3986,63	0,15
100	3558,86	42	0	0	0	0	3978,86	0,14
105	3546,84	42	0	0	0	0	3966,84	0,15
110	3546,84	42	0	0	0	0	3966,84	0,15
115	3546,84	42	0	0	0	0	3966,84	0,14
120	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,14
125	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,14
130	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,14
135	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,15
140	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,14
145	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,15
150	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,14

## 7.5. Heurística iterativa de inserción en dos fases

La heurística descrita en el apartado anterior es, entre todas las propuestas, el planteamiento que mejores resultados ha dado. Sin embargo, de cara a su aplicación en un entorno real, donde existe incertidumbre, presenta una serie de deficiencias que es importante considerar.

La problemática parte del hecho de que la heurística trabaja con pares de tareas; esto trae como resultado que en determinadas circunstancias algunos pares, que serán llamados *pares críticos* no serían seleccionados, eligiéndose otros con mejor valoración, dado que la heurística busca los pares que producen mayor ahorro. Al no elegirse esos pares se provocaría que alguna de las tareas que lo componen no pueda realizarse a tiempo, debido a que el emparejamiento elegido le impide cumplir con sus restricciones temporales.

Supóngase el ejemplo de la Figura 7.13; en el instante *time*, en el cual se va a producir una reoptimización, solamente quedan por realizarse dos tareas, ambas de exportación. El vehículo A, que actualmente se encuentra en el depósito, tiene asignada la realización de la tarea 1, mientras que el vehículo B se está dirigiendo al origen de la tarea 2. Llegado el momento de la reoptimización, lo primero que realiza la heurística I2PH es la elección de los pares, basándose en el ahorro. Atendiendo a los tiempos entre tareas mostrados en la tabla 7.5, el ahorro de los pares  $p_{f_{v_A}^{ini}1}$  y  $p_{f_{v_A}^{ini}2}$  sería nulo, el

del par  $p_{f_{v_B}^{ini1}}$  de 4, y el de  $p_{f_{v_B}^{ini2}}$  de 2; por tanto la fase de selección elegiría los pares  $p_{f_{v_B}^{ini1}}$  y  $p_{f_{v_A}^{ini2}}$ . Pero, si se diera la circunstancia que  $time$  fuese por ejemplo 250 y que la restricción temporal de la tarea 2 fuera, por ejemplo,  $L_2^D = 255$ , la tarea 1 sería imposible de alcanzarse a tiempo, incurriendo en un coste por incumplimiento de la ventana temporal.

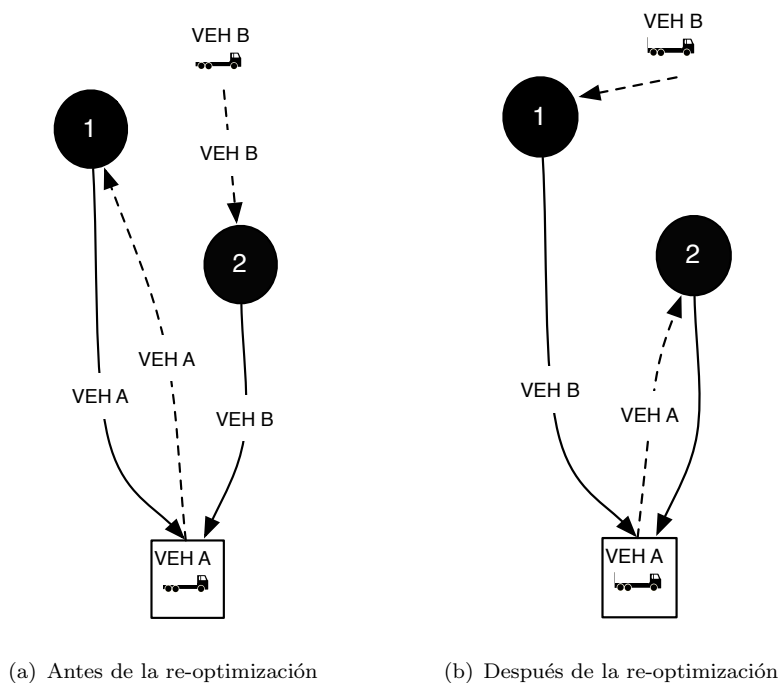


FIGURA 7.13: Tarea inalcanzable tras la reoptimización

TABLA 7.13: Datos del ejemplo de la Figura 7.13

$t_1$	$t_2$	$t_{A1}$	$t_{A2}$	$t_{B1}$	$t_{B2}$
5	4	5	4	1	2

Otro de los inconvenientes de la heurística I2PH se puede también deducir del ejemplo anterior; se trata del cambio de asignación de la siguiente tarea a realizar en mitad de recorrido del vehículo, es decir, un vehículo que se encuentra de camino hacia el origen de una determinada tarea de repente recibe la orden de dirigirse a una tarea distinta. Este hecho, aparte de provocar el comprensible malestar en los conductores puede en determinadas circunstancias volverse ineficiente, realizándose recorridos innecesarios. Volviendo al ejemplo, la situación puede mostrarse viendo el vehículo B, que estaba camino de la tarea 2 cuando se le ordena ir a la localización de la tarea 1.

Basada en la heurística anterior, se propone una nueva heurística que soluciona los problemas anteriormente mencionados, la *heurística iterativa de inserción en dos*

*fases* (I<sup>2</sup>2PH). Dos han sido los mecanismos incluidos en la heurística para solucionar los problemas mencionados anteriormente: el primero, la identificación de las llamadas *tareas prioritarias*, a las cuales se le daría prioridad a la hora de la selección y consecuentemente en la creación de las rutas; el segundo, el *factor de mejora*, que limita el cambio de la asignación hecha a un vehículo en ruta a aquellos cambios que mejoren sustancialmente la solución.

---

**Algoritmo 9** Heurística iterativa de inserción en dos fases

---

```

1: procedure I22PH( $\mathcal{T}, vstate, tstate, vpos, time, traffic$ )
2:    $\mathcal{P} \leftarrow \text{FEASIBILITYMERGEDTASKS}(time, \mathcal{T})$ 
3:    $E_{ij}, L_{ij}, RS_{ij} \leftarrow \text{DESCRIPTION}(p_{ij}) \quad \forall p_{ij} \in \mathcal{P}$ 
4:    $sav_{p_{ij}} \leftarrow \text{EVALUATION}(p_{ij}) \quad \forall p_{ij} \in \mathcal{P}$ 
5:    $sav_{p_{ij}} \leftarrow \text{IMPROVEMENTFACTOR}(p_{ij}, sav_{p_{ij}}, \mathcal{D})^a; \forall p_{ij} \in \mathcal{P}$ 
6:   while  $\mathcal{P} \neq \emptyset$  do
7:      $\mathcal{S} \leftarrow \emptyset$ 
8:      $\mathcal{PT} \leftarrow \text{CHECKPRIORITARYTASK}(time, \mathcal{T})$ 
9:     if  $\mathcal{PT} \neq \emptyset$  then
10:      for  $i^p \in \mathcal{PT}$  do
11:         $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup p_{f_v^{ini} i^p}$ 
12:         $\mathcal{P} \leftarrow \mathcal{P} / p_{f_v^{ini} j} \quad \forall j \in \mathcal{T}$ 
13:      end for
14:    end if
15:     $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \text{SELECTION}(\mathcal{P}, sav_{p_{ij}})$ 
16:     $\mathcal{R} \leftarrow \text{ITERATIVEINSERTION}(\mathcal{S}, E_{ij}, L_{ij}, RS_{ij}, \mathcal{R})$ 
17:  end while
18: end procedure

```

---

El Algoritmo 9 muestra la implementación de la heurística. Parte del algoritmo coincide con el Algoritmo 6, como por ejemplo las funciones FEASIBILITYMERGEDTASKS, DESCRIPTION y EVALUATION (Líneas 2, 3 y 4), que se encargan de seleccionar, describir y evaluar los posibles emparejamientos de tareas,  $\mathcal{P}$ .

Luego, se llama a la función IMPROVEMENTFACTOR (Línea 5), que potencia los pares formados por una tarea ficticia que represente a un vehículo en tránsito hacia la segunda tarea del par; los pares que cumplen esta condición forman el conjunto  $\mathcal{D}$ . La potenciación de estos pares se realiza mejorando su ahorro,  $sav_{p_{ij}}$ , a través del *factor de mejora*, multiplicándolo por un escalar, IF<sub>1</sub>, y sumándole un valor fijo, IF<sub>2</sub>. De este modo su ahorro será mayor y tendrá más posibilidades de ser escogido. La función se muestra en el Algoritmo 10.

---

**Algoritmo 10** Heurística iterativa de inserción en dos fases - Factor de mejora

---

```

1: function IMPROVEMENTFACTOR( $p_{ij}, sav_{p_{ij}}, \mathcal{D}$ )
2:   if  $p_{ij} \cap \mathcal{D} \neq \emptyset$  then
3:      $sav_{p_{ij}} \leftarrow sav_{p_{ij}} \cdot \text{IF}_1 + \text{IF}_2$ 
4:   end if
5: end function

```

---

A partir de este punto se entra en un bucle que iterativamente realiza los procesos de selección de los mejores pares (Línea 15) y la inserción de uno de ellos en la ruta (Línea 16). La selección se realiza a través de la función SELECTION, que coincide con la heurística anterior; la inserción a través de la función ITERATIVEINSERTION, descrita en el Algoritmo 11.

---

**Algoritmo 11** Heurística dinámica de inserción iterativa - Tareas prioritarias
 

---

```

1: function ITERATIVEINSERTION( $\mathcal{S}, E_{ij}, L_{ij}, RS_{ij}, \mathcal{R}$ )
2:   if  $p_{f_v^{ini}j} \cap \mathcal{S} \neq \emptyset$  then
3:      $r_v \leftarrow \{p_{f_v^{ini}j}, p_{if_v^{end}}\} \quad \forall v \in \mathcal{V} : p_{f_v^{ini}j} \wedge p_{if_v^{end}} \in \mathcal{S}$ 
4:      $\mathcal{R} \leftarrow \mathcal{R} \cup r_v \quad \forall v \in \mathcal{V}^{\mathcal{U}}$ 
5:      $r_{|\mathcal{V}|+1} \leftarrow \{f_{|\mathcal{V}|+1}^{ini}, f_{|\mathcal{V}|+1}^{end}\}$ 
6:      $\mathcal{R} \leftarrow \mathcal{R} \cup r_{|\mathcal{V}|+1}$ 
7:      $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} / p_{f_v^{ini}j} \quad \forall v \in \mathcal{V}^{\mathcal{U}}$ 
8:      $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} / p_{if_v^{end}} \quad \forall v \in \mathcal{V}^{\mathcal{U}}$ 
9:   else if  $\mathcal{S} \cap \mathcal{PT} \neq \emptyset$  then
10:     $\exists p_{i^*j^*} \in \mathcal{PT} \mid L_{i^*j^*} \leq L_{ij}, \quad \forall i \neq i^*, j \neq j^*$ 
11:   else
12:     $\exists p_{i^*j^*} \in \mathcal{S} \mid L_{i^*j^*} \leq L_{ij}, \quad \forall i \neq i^*, j \neq j^*$ 
13:   end if
14:    $\exists p_{i^*j^*} \in \mathcal{S} \mid L_{i^*j^*} \leq L_{ij}, \quad \forall i \neq i^*, j \neq j^*$ 
15:    $v \leftarrow 0$ 
16:   repeat
17:      $v \leftarrow v + 1$ 
18:      $cond1 \leftarrow \text{Eq. 7.29}$ 
19:      $cond2 \leftarrow \text{Eq. 7.30}$ 
20:   until  $cond1 \wedge cond2$ 
21:    $r_v \leftarrow \{p_{f_v^{ini}j}, \dots, p_{i^*j^*}, p_{if_v^{end}}\}$ 
22:   if  $vstate(v) = NOUSED$  then
23:      $vstate(v) = USED$ 
24:      $r_{|\mathcal{V}|+1} \leftarrow \{f_{|\mathcal{V}|+1}^{ini}, f_{|\mathcal{V}|+1}^{end}\}$ 
25:      $\mathcal{R} \leftarrow \mathcal{R} \cup r_{|\mathcal{V}|+1}$ 
26:   end if
27:    $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} / p_{i^*j^*}$ 
28: end function

```

---

▷ Para  $p_{i^*j^*}$  y  $r_v$

Previo a la llamada a la función SELECTION se ha analizado si existían *tareas prioritarias*, función CHECKPRIORITARYTASK, definidas como las tareas que sólo pueden ser alcanzadas por un vehículo en concreto (ver Algoritmo 12). En caso de existir tales tareas, al par compuesto por la tarea y el vehículo que puede realizarla se le considerará un *par crítico* y se forzará su selección (Línea 11 del Algoritmo 9), evitando de ese modo que la tarea fuese asignada a un vehículo distinto.

La función ITERATIVEINSERTION sólo añade a las rutas uno de los pares que se han seleccionado previamente, de modo que en la siguiente iteración del bucle se busca si han aparecido nuevas tareas prioritarias, tomando como referencia las rutas

**Algoritmo 12** Heurística dinámica de inserción iterativa - Tareas prioritarias

---

```

1: function CHECKPRIORITARYTASK( $time, \mathcal{T}$ )
2:    $ft_v \leftarrow st_{f_v^{ini}}^D + s_{f_v^{ini}}^D \quad \forall v \in \mathcal{V}$ 
3:   for  $i \in \mathcal{T}_r$  do
4:      $nPV \leftarrow 0$ 
5:     for  $v \in \mathcal{V}$  do
6:        $PossibleVehicle \leftarrow (ft_v + t_{vi} < L_i^O) \wedge (ft_v + t_{vi} + s_i^O + t_i < L_i^D)$ 
7:        $nPV \leftarrow nPV + PossibleVehicle$ 
8:     end for
9:     if  $nPV \leq 1$  then
10:       $\mathcal{PT} \leftarrow i$ 
11:    end if
12:  end for
13: end function

```

---

parcialmente creadas. El orden de los pares que van insertándose en la ruta atienden al criterio de urgencia, primero se insertan las tareas prioritarias y luego el resto ordenadas según su tiempo de comienzo más tardío,  $L_{ij}$ .

Idénticas simulaciones que las realizadas con la heurística anterior han servido para testear esta heurística. Los resultados (Figura 7.14 y Tablas 7.14, 7.15 y 7.16) demuestran que en entornos estáticos y deterministas, como los que se han testado en este capítulo, ambas heurísticas funcionan de un modo muy parecido; este hecho parece lógico dado que los fundamentos son los mismos, y las mejoras incluidas atienden a entornos dinámicos y estocásticos. Si bien es interesante reseñar dos aspectos: el primero, que los resultados son parecidos, pero I<sup>2</sup>2PH mejora los resultados cuando el número de tareas crece; y segundo, que I<sup>2</sup>2PH necesita un mayor tiempo de computación, aunque no resulta excesivo.

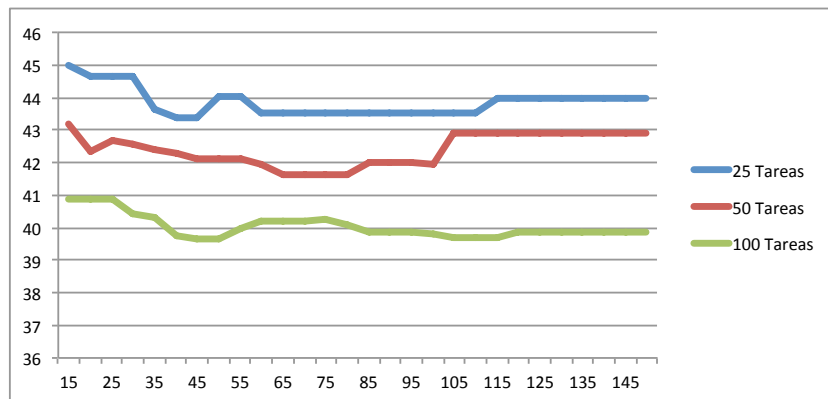


FIGURA 7.14: Heurística I<sup>2</sup>2PH con tiempo de espera máximo (Test R1.1)

TABLA 7.14: Análisis del MAXWAITING en la heurística I<sup>2</sup>2PH (Test R1.1 - 25 Tareas)

MAXWAITING	Dist	nVeh	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
15	1024,26	10	0	0	0	0	1124,26	0,18
20	1016,18	10	0	0	0	0	1116,18	0,06
25	1016,18	10	0	0	0	0	1116,18	0,06
30	1016,18	10	0	0	0	0	1116,18	0,06
35	990,30	10	0	0	0	0	1090,30	0,06
40	984,40	10	0	0	0	0	1084,40	0,06
45	984,40	10	0	0	0	0	1084,40	0,06
50	990,86	11	0	0	0	0	1100,86	0,06
55	990,86	11	0	0	0	0	1100,86	0,06
60	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,06
65	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,06
70	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,06
75	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,06
80	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,06
85	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,07
90	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,06
95	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,06
100	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,06
105	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,06
110	978,08	11	0	0	0	0	1088,08	0,06
115	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,06
120	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,06
125	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,06
130	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,06
135	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,07
140	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,07
145	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,07
150	978,92	12	0	0	0	0	1098,92	0,07

TABLA 7.15: Análisis del MAXWAITING en la heurística I<sup>2</sup>2PH (Test R1.1 - 50 Tareas)

MAXWAITING	Dist	nVeh	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
15	1958,10	20	0	0	0	0	2158,10	0,15
20	1918,44	20	0	0	0	0	2118,44	0,15
25	1932,86	20	0	0	0	0	2132,86	0,15
30	1928,97	20	0	0	0	0	2128,97	0,14
35	1920,22	20	0	0	0	0	2120,22	0,15
40	1914,33	20	0	0	0	0	2114,33	0,14
45	1905,13	20	0	0	0	0	2105,13	0,15
50	1906,21	20	0	0	0	0	2106,21	0,14
55	1906,21	20	0	0	0	0	2106,21	0,15
60	1896,98	20	0	0	0	0	2096,98	0,16
65	1871,42	21	0	0	0	0	2081,42	0,14
70	1871,42	21	0	0	0	0	2081,42	0,15
75	1871,42	21	0	0	0	0	2081,42	0,15
80	1871,42	21	0	0	0	0	2081,42	0,14
85	1879,68	22	0	0	0	0	2099,68	0,14
90	1879,68	22	0	0	0	0	2099,68	0,15
95	1879,68	22	0	0	0	0	2099,68	0,15
100	1876,66	22	0	0	0	0	2096,66	0,15
105	1916,19	23	0	0	0	0	2146,19	0,15
110	1916,19	23	0	0	0	0	2146,19	0,15
115	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,16
120	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,15
125	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,15
130	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,15
135	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,16
140	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,15
145	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,15
150	1915,87	23	0	0	0	0	2145,87	0,15



TABLA 7.16: Análisis de MAXWAITING en la heurística I<sup>2</sup>PH (Test R1.1 - 100 Tareas)

MAXWAITING	Dist	nVeh	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
15	3696,22	39	0	0	0	0	4086,22	0,49
20	3696,62	39	0	0	0	0	4086,62	0,50
25	3696,62	39	0	0	0	0	4086,62	0,50
30	3652,69	39	0	0	0	0	4042,69	0,50
35	3633,84	40	0	0	0	0	4033,84	0,49
40	3575,47	40	0	0	0	0	3975,47	0,49
45	3565,49	40	0	0	0	0	3965,49	0,49
50	3565,49	40	0	0	0	0	3965,49	0,50
55	3596,06	40	0	0	0	0	3996,06	0,49
60	3610,06	41	0	0	0	0	4020,06	0,49
65	3611,11	41	0	0	0	0	4021,11	0,50
70	3612,02	41	0	0	0	0	4022,02	0,49
75	3615,96	41	0	0	0	0	4025,96	0,50
80	3601,30	41	0	0	0	0	4011,30	0,49
85	3576,63	41	0	0	0	0	3986,63	0,50
90	3576,63	41	0	0	0	0	3986,63	0,48
95	3576,63	41	0	0	0	0	3986,63	0,52
100	3558,86	42	0	0	0	0	3978,86	0,49
105	3546,84	42	0	0	0	0	3966,84	0,50
110	3546,84	42	0	0	0	0	3966,84	0,50
115	3546,84	42	0	0	0	0	3966,84	0,55
120	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,52
125	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,49
130	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,50
135	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,50
140	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,50
145	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,50
150	3554,37	43	0	0	0	0	3984,37	0,51

## 7.6. Resultados de interés para la tesis

Este capítulo ha presentado una serie de heurísticas para la resolución del *daily drayage problem*; las cuales han sido adaptadas a entornos dinámicos. De todas las heurísticas planteadas la que muestra un mejor rendimiento es la heurística de inserción en dos fases.

Cada una de esas heurísticas ha sido parametrizada haciendo uso de la instancia R1.1 en un entorno estático y determinista. Se ha hecho uso de tal instancia al tratarse de una de las más restrictivas de toda la batería generada (ver Apéndice A). El hecho de parametrizar en un entorno estático y determinista se debe a la necesidad de que la heurística funcione correctamente cuando todo vaya sucediendo según lo esperado.

Sobre la heurística I<sup>2</sup>PH se han realizado una serie de modificaciones que, aunque aumentan el tiempo de computación, reducen el riesgo de que aparezcan una serie de situaciones no deseables. Esto ha dado lugar a la heurística I<sup>2</sup>PH.



## Módulo de optimización de tareas de acarreo - mecanismos de mejora

El capítulo anterior describió y parametrizó diferentes heurísticas que forman parte del módulo de optimización, englobado dentro del sistema dinámico desarrollado en esta tesis.

En este capítulo se van a describir una serie de búsquedas locales que permitan mejorar las soluciones proporcionadas por las heurísticas anteriormente descritas. De igual modo se describirá y parametrizará una metaheurística, un algoritmo genético, que tiene un doble objetivo: por un lado mejorar las soluciones proporcionadas por las heurísticas evitando caer en óptimos locales; y por otro lado, ser un mecanismo de adaptación de las soluciones proporcionadas en reoptimizaciones previas a las circunstancias que acontezcan en la nueva reoptimización.

### 8.1. Búsqueda local

Los algoritmos de búsqueda local parten de una solución inicial y, aplicándole operadores de variación, la van alterando; si la solución alterada es mejor que la original, se acepta; si no lo es, se vuelve a la inicial. El procedimiento se repite hasta que no se consigue mejora en la solución. En este trabajo la solución inicial coincidirá con la solución encontrada por alguna de las heurísticas anteriormente descritas.

Dado que la mejor solución fue proporcionada por las heurísticas I2PH e I<sup>2</sup>2PH, y que estas trabajan con pares de tareas, las búsquedas locales que serán descritas están adaptadas a dicha situación. En el caso de querer aplicar algunos de los operadores de búsqueda local a algunas de las otras heurísticas, sólo sería necesario considerar sus tareas como pares.

Tres operadores de búsqueda local son propuestos: el operador de CRUCE, el operador de COMBINACIÓN, y el operador de INSERCIÓN. La secuencia en que estos operadores son implementados es  $\text{CRUCE} \rightarrow \text{COMBINACIÓN} \rightarrow \text{INSERCIÓN}$ . Primero, el operador de CRUCE es aplicado con el objetivo de mejorar la combinación entre pares. Después, los operadores de COMBINACIÓN e INSERCIÓN tratan de reducir el número de vehículos nuevos a incorporarse. Estos dos últimos operadores deben tratar de reducir sólo el número de rutas asignadas a vehículos que no han sido usados previamente, dado que el hecho de dejar de usar una ruta usada previamente no supondría ahorro en costes alguno. Los tres operadores son una adaptación a problemas dinámicos de los operadores mostrados en [Caris y Janssens \(2009\)](#).

### 8.1.1. Operador de Cruce

En el operador de cruce dos pares son seleccionados  $(g, h)$  y  $(i, j)$ . Estos pares son cruzados, resultando de tal cruce dos nuevos pares,  $(g, j)$  y  $(i, h)$ ; la viabilidad de los nuevos pares debe ser estudiada. Si ambos pares son viables, el algoritmo examina si pueden ser reinsertados en la rutas. Entonces dos posibles combinaciones son analizadas: insertar  $(g, j)$  en la primera ruta e  $(i, h)$  en la segunda; e insertar  $(g, j)$  en la segunda ruta e  $(i, h)$  en la primera. Si alguna de las combinaciones es posible, esta sería añadida a la lista de posibles movimientos de CRUCE. La mejora producida por un movimiento de CRUCE sería:

$$I_{ghij} = d_{gh} + d_{ij} - d_{gi} - d_{ih} - VR_{ghij} \quad (8.1)$$

donde  $VR_{ghij}$  es la mejora debido a la reducción del número de vehículos necesarios. Esta mejora sería sólo posible si una de las nuevas rutas resultantes contuviera sólo tareas ficticias y el vehículo que tiene que llevar a cabo la ruta no hubiera sido usado todavía a lo largo del día, lo que significa que estaría registrado como NONUSED.

La búsqueda local de CRUCE parará después de un número de iteraciones sin reducir el coste total esperado.

### 8.1.2. Operador de Combinación

El operador de combinación comprueba si las tareas servidas por dos rutas pueden ser llevadas a cabo por una sola ruta. El operador trata de combinar las rutas de los vehículos que no han sido usados todavía con otras rutas, con el objetivo de reducir el número de vehículos a usar. Dos rutas podrán ser combinadas si el último par de la ruta a combinar puede ser completado antes que el tiempo de comienzo más tardío de la ruta con la que se combina.

### 8.1.3. Operador de Inserción

Este operador elimina pares de una ruta para insertarlos dentro de las otras rutas. Al igual que el operador por COMBINACIÓN, el operador de INSERCIÓN trata de reducir el número de nuevos vehículos a usar. Así que las rutas potenciales en las cuales se tratará de reinsertar sus tareas en otras rutas serán las rutas de los vehículos *NONUSED*. Si no se pudieran reinsertar todos los pares de una determinada ruta, la ruta se dejaría intacta, sin la reinserción de ninguno de sus pares.

## 8.2. Algoritmo genético

Los algoritmos genéticos, *genetic algorithms (GAs)*, son metaheurísticas basadas en la teoría de la evolución de Charles Darwin (1809-1882).

Darwin entendió que toda población consiste de individuos ligeramente distintos unos de otros. Las variaciones que existen entre los individuos hace que cada uno tenga distintas capacidades para adaptarse al medio natural, reproducirse exitosamente y transmitir sus rasgos a su descendencia. Al paso de las generaciones, los rasgos de los individuos que mejor se adaptaron a las condiciones naturales se vuelven más comunes y la población evoluciona. Darwin llamó a este proceso *descendencia con modificación*. Del mismo modo, la naturaleza selecciona las especies mejor adaptadas para sobrevivir y reproducirse, proceso que se conoce con el nombre de *selección natural*.

Los GAs usan una analogía de este comportamiento natural trasladado al mundo de la computación, con el objetivo último de encontrar las soluciones mejor adaptadas a un problema bajo estudio. Los GAs trabajan con una población de *individuos*, cada uno de los cuales representa una posible solución al problema planteado. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, llamado *fitness*, relacionado con la bondad de dicha solución. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema mayor será su *fitness*, y por tanto mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su *material genético*, sus propiedades, con otro individuo seleccionado. Este cruce producirá nuevos individuos, descendientes de los anteriores, los cuales comparten algunas de las características de sus padres. En sentido opuesto, cuanto menor sea la adaptación de un individuo, menor será la probabilidad de que dicho individuo sea seleccionado para la reproducción, y más dificultad existirá a que su material genético se propague en sucesivas generaciones. De esta manera se produce una nueva población de posibles soluciones, la cual reemplaza a la anterior y verifica la interesante propiedad de que contiene una mayor proporción de buenas características en comparación con la población anterior. Así a lo largo de las generaciones las buenas características se propagan a través de la población. Favoreciendo el cruce de los individuos mejor adaptados, van siendo exploradas las áreas más prometedoras del espacio

de búsqueda.

Los conceptos básicos de dichos algoritmos fueron propuestos por [Holland \(1975\)](#), siendo [Goldberg \(1989\)](#) quien desarrollo el uso de los mismos para solventar complejos problemas de optimización. Los GAs han sido ampliamente usados para solventar el VRPTW ([Braysy y Gendreau, 2005](#)), incluyendo versiones estocásticas de dichos problemas ([Mak y Guo, 2004](#)).

### 8.2.1. Bucle de optimización

El GA implementado está basado en el Algoritmo Genético Simple, cuyo pseudocódigo se muestra en el Algoritmo [13](#); este funciona como un bucle que, partiendo de una población inicial, realiza miles de veces el proceso de selección, cruce, mutación, adición de nuevos individuos a la población, y eliminación de otros en busca de la solución óptima para solventar un problema dado.

Inicialmente, se genera la población inicial mediante la función `POPULATION` (Línea [1](#)) y se evalúa la misma haciendo uso de la función `EVALUATION`, lo que permitirá conocer el *fitness* de cada individuo de la población (Línea [2](#)). Posteriormente se entra en el bucle donde se encuentran las funciones encargadas de mejorar las soluciones proporcionadas por la población inicial a través de operadores genéticos. Este bucle se ejecutará mientras no se cumpla una condición de parada (Línea [3](#)). Dentro del bucle, primero se seleccionan dos individuos de la población, por medio de la función `SELECTION` (Línea [4](#)), atendiendo al *fitness* de cada uno. Seguidamente dependiendo de un valor generado aleatoriamente, *Pcross*, se escoge un operador genético u otro (Línea [5](#)); o bien se cruzan los individuos seleccionados a través del operador `CROSSOVER` (Línea [8](#)), o bien se mutan los mismos por medio del operador `MUTATION` (Línea [6](#)). De este modo se generan dos nuevos individuos, descendientes (*offsprings*) de sus progenitores, que deberán ser evaluados (Línea [11](#)). La nueva población cuenta con dos miembros más que la población inicial, y para mantener estable el tamaño de la población dos individuos son seleccionados para su eliminación, función `REJECT` (Línea [12](#)).

Como se puede observar la implementación de un GA plantea la elección de una multitud de variables: elección de la codificación de las soluciones, tamaño de la población, operadores genéticos y de selección, probabilidad de los mismos, etc. La correcta elección de cada uno de estos parámetros hará que el algoritmo se comporte de una manera u otra al enfrentarse a un determinado problema, y consecuentemente determinará la idoneidad del algoritmo para resolver el problema planteado. Desgraciadamente no existe ningún criterio científico que permita vislumbrar que parámetros escoger, quedando la elección de cada uno de ellos determinada a través de la experimentación.

Los siguientes epígrafes muestran las diferentes alternativas que han sido estudiadas para definir el GA más adecuado para el problema planteado; el último de

**Algoritmo 13** Algoritmo Genético

---

```

1:  $population \leftarrow \text{POPULATION}(\text{sizepopulation})$ 
2:  $fitness \leftarrow \text{EVALUATION}(population)$ 
3: while  $stopcondition == \text{False}$  do
4:    $parents \leftarrow \text{SELECTION}(population, fitness)$ 
5:   if  $\text{RAND}(0, 1) < P_{cross}$  then
6:      $offsprings \leftarrow \text{CROSSOVER}(parents)$ 
7:   else
8:      $offsprings \leftarrow \text{MUTATION}(parents)$ 
9:   end if
10:   $population \leftarrow population \cup offsprings$ 
11:   $fitness \leftarrow \text{EVALUATION}(population)$ 
12:   $population \leftarrow \text{REJECT}(population, fitness)$ 
13: end while

```

---

ellos detalla los parámetros que finalmente resultaron más favorables y el proceso de experimentación seguido para encontrarlos.

### 8.2.2. Codificación cromática

Cada uno de los diferentes individuos que forman la población del GA representa una solución al problema. Estas soluciones se encuentran codificadas a través de uno o varios *cromosomas*, vectores, los cuales están formados por diferentes *genes*. La definición de cómo extraer información sobre las soluciones de estos cromosomas se determina a través de la *Codificación Cromática*.

Existen numerosas codificaciones propuestas en la literatura y dependiendo del problema a resolver se ha optado por una codificación u otra. Los primeros algoritmos genéticos solían usar una codificación binaria para representar las soluciones (Goldberg, 1989), sin embargo los problemas tipo TSP han sido codificado en la mayoría de los casos según una codificación basada en la trayectoria (Brady, 1985). Nuevas codificaciones han ido surgiendo a lo largo de todos estos años, algunas en las que la solución se representa por más de un cromosoma o en las que cada gen del cromosoma contiene múltiple información (Wang et al., 2007).

Para este trabajo dos codificaciones ha sido estudiadas. La primera de ella se trata de la codificación tradicional empleada en los problemas de tipo TSP pero adaptada al problema bajo estudio. Cada solución es representada por un único cromosoma compuesto por  $N$  genes, que serán la suma del número de tareas pendientes de realizar y del número de vehículos existente (representados como tareas ficticias). Esto permite que el cromosoma considere no sólo las tareas pendientes, sino que tenga en cuenta las tareas que se están ejecutando en dicho momento.

Cada tarea, bien sean real o ficticia, tiene asignada un número real y positivo que la identifica. Cada gen del cromosoma contendrá uno de dichos números. La inter-

pretación de la solución así codificada es sencilla, cada vehículo realizará la tarea ficticia que le corresponde y todas las tareas que se encuentran en el cromosoma a la derecha de la misma hasta llegar a la siguiente tarea ficticia.

10	1*	6	4	3*	7	8	5	2*	9
----	----	---	---	----	---	---	---	----	---

(a) Desordenada

1*	6	4	3*	7	8	5	2*	9	10
----	---	---	----	---	---	---	----	---	----

(b) Ordenada

FIGURA 8.1: Representación Cromática A

La representación de una posible solución se ejemplifica en la Figura 8.1a. En la misma, las tareas numeradas entre 3 y 10 se corresponden con tareas reales, y por tanto tareas pendientes de realizar, mientras que las tareas numeradas entre 1 y 3 son tareas ficticias, representando tanto a vehículos como a las posibles tareas que estén ejecutando en ese preciso momento. Esta codificación ha de entenderse como una codificación circular, de modo que el vehículo codificado por la tarea ficticia 2 realizará la tarea 9, volviendo al principio de la ristra para realizar la tarea 10. Para facilitar la interpretación de cromosoma y la implementación de los posteriores operadores genéticos se forzará a todos los cromosomas a empezar por una tarea ficticia, sin que eso suponga pérdida o modificación de la información que suministra (Ver Figura 8.1b)

La segunda de las codificaciones está basada en la codificación presentada por Wang et al. (2007). En dicha codificación cada tarea pendiente es asociada y fijada a un gen, al contrario que en el caso anterior. El valor de cada gen determinará qué vehículo y en qué orden se sirven las mismas. Este valor está caracterizado por cuatro dígitos, el primero determina el vehículo que llevará a cabo la tarea y los tres siguientes determinan el orden en el que ésta será servida entre todas las tareas encargadas al mismo vehículo. Las tareas con menor valor en estos dígitos serán servidas en primer lugar. Un ejemplo de dicha codificación se muestra en la Figura 8.2.

4	5	6	7	8	9	10
1.324	3..713	1.123	3.096	3.115	2.560	2.910

FIGURA 8.2: Representación Cromática B

Los ejemplos mostrados anteriormente codifican la misma solución, siendo las



rutas de cada vehículo las mostradas a continuación:

- $1^* \rightarrow 6 \rightarrow 4$
- $2^* \rightarrow 9 \rightarrow 10$
- $3^* \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 5$

Dichas codificaciones representan una posible solución al problema planteado; sin embargo, no se garantiza que la solución sea factible. Esto que podría parecer un problema no es tal, debido a que el algoritmo penaliza a las tareas no factibles a través de su *fitness*, y por tanto la propagación de las mismas a lo largo de muchas generaciones se hace difícil. Sin embargo, este tipo de soluciones pueden aportar determinadas propiedades a la población que favorezcan la diversificación de la misma.

En este momento es necesario realizar una aclaración; dado que el problema a resolver es una instantánea de la situación real de las tareas y los vehículos, puede que haya tareas que en ese momento se estén realizando y tareas que ya hayan sido completadas. *¿Cómo resuelven dichas codificaciones tal complejidad?*

Pues, por una parte están las tareas ficticias, cada vehículo lo primero que debe servir es la tarea ficticia que le representa, que contendrá intrínsecamente información sobre si el vehículo se encuentra libre u ocupado y, en caso de estar ocupado, información sobre la tarea que ha de concluir. Por lo tanto, el tratamiento de tareas en proceso está resuelto.

1*	6	4	3*	8	5	2*	10
----	---	---	----	---	---	----	----

(a) Representación Cromática A

4	5	6	7	8	9	10
1.324	3..713	1.123	3.096	3.115	2.560	2.910
1	1	1	0	1	1	0

MASK

(b) Representación Cromática B

FIGURA 8.3: Representación Cromática cuando existen tareas finalizadas

¿Y qué ocurre con las tareas ya finalizadas?, en ese caso dependerá de la codificación que se esté usando. En el caso de la codificación cromática A bastaría con excluir dichas tareas de la ristra de tareas, siendo por tanto cada vez el vector más pequeño, hasta que llegara un momento en el que el mismo estaría sólo compuesto de tareas ficticias. En el caso de la codificación cromática B no sería posible ir reduciendo

el vector, por la propia definición realizada del cromosoma, y por tanto se necesita de algún mecanismo que permita decir qué tareas han sido completadas y, por tanto, no es necesario tener en cuenta; un vector de enmascaramiento, MASK, es usado para tal fin.

Supóngase que las tareas 7 y 9 ya han sido realizadas. En tal caso la representación cromática sería ahora la mostrada en la Figura 8.3. En el caso de representación cromática A el número de genes ha disminuido, en el caso de representación cromática B, se ha añadido un vector de enmascaramiento, que identifica qué tareas han de ser tenidas en cuenta.

### 8.2.3. Población inicial

La población inicial estará formada por un número determinado de individuos, *sizepopulation*, codificados según alguna de las representaciones del epígrafe anterior. Estos formarán una matriz de genes en la que cada vector será una posible solución del problema, un individuo de la población.

La población será creada mayoritariamente de forma aleatoria; cada vez que el sistema realice una reoptimización, se generará dicha población de nuevo. Además se podrá pasar a la población inicial individuos creados mediante procedimientos heurísticos, como los presentados en el Capítulo 7, o provenientes de soluciones previas del sistema (Ver Figura 8.4). Este hecho es de especial importancia en el sistema dinámico que se presenta en esta tesis, al permitir el GA una mejora continua con respecto a lo que previamente se tenía.

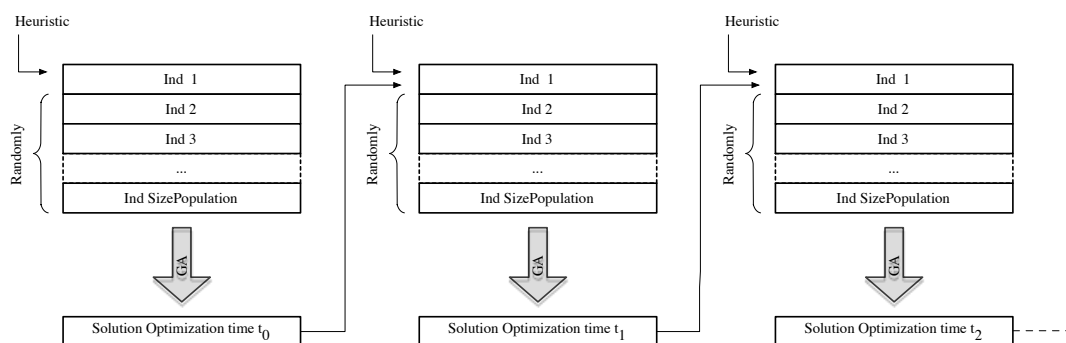


FIGURA 8.4: Evolución de la población a lo largo de las diferentes reoptimizaciones

### 8.2.4. Evaluación y selección de los individuos

Los diferentes individuos que componen la población han de ser evaluados, a través de la función de evaluación, para de ese modo conocer el *fitness* que tienen como

solución del problema.

La función de evaluación estará íntimamente relacionada con la función objetivo mostrada en el Capítulo 5, y por tanto dependerá de:

- el número de nuevos vehículos usados en la solución del problema,
- la distancia que recorren dichos vehículos,
- el incumplimiento de las ventanas temporales que deben cumplir los vehículos.

Dado que la función de evaluación depende de parámetros de costes, los mejores individuos serán aquellos en los que el resultado de la evaluación sea menor. Los individuos con mayor *fitness*, aquellos que presentan una mejor adaptación al problema, serán los que obtengan un menor valor en la evaluación; esto es debido a que lo deseado es minimizar el coste total de la planificación de la jornada de acarreo.

Atendiendo a dicha evaluación, se seleccionaran los individuos que van a cruzarse o mutarse; a estos individuos se les suele llamar *padres* o *progenitores*. Esta selección se efectuará usando algún procedimiento que, en cierto grado, favorezca a los individuos mejor adaptados, aunque es importante que la misma no escoja siempre a los mejores individuos, ya que convertiría al GA en una especie de búsqueda local, donde no existiría diversificación en la población.

Existen diferentes procedimientos de selección, siendo tres métodos, con sus respectivas variantes, los que se han testeado en este trabajo: selección por torneo, selección proporcional al *fitness*, selección proporcional al rango.

#### 8.2.4.1. Método de selección por torneo

En el método de selección por torneo un número de individuos de la población son escogidos al azar y compiten entre sí en función de la función de evaluación de individuos.

Se han implementado varias formas de torneo, las cuales se especifican a continuación y se representan en la Figura 8.5:

- Un solo torneo: se realiza un solo torneo donde los dos individuos mejor adaptados son escogidos como progenitores.
- Dos torneos: se realizan dos torneos y se escoge como progenitor al mejor individuo de cada uno de ellos. Es posible que existan coincidencias de participantes.

- Dos torneos sin coincidencias: se realizan dos torneos y se escoge como progenitor al mejor individuo de cada uno de ellos. No se permiten coincidencias entre los participantes de cada torneo, es decir, no puede haber un mismo participante en ambos torneos a la vez.

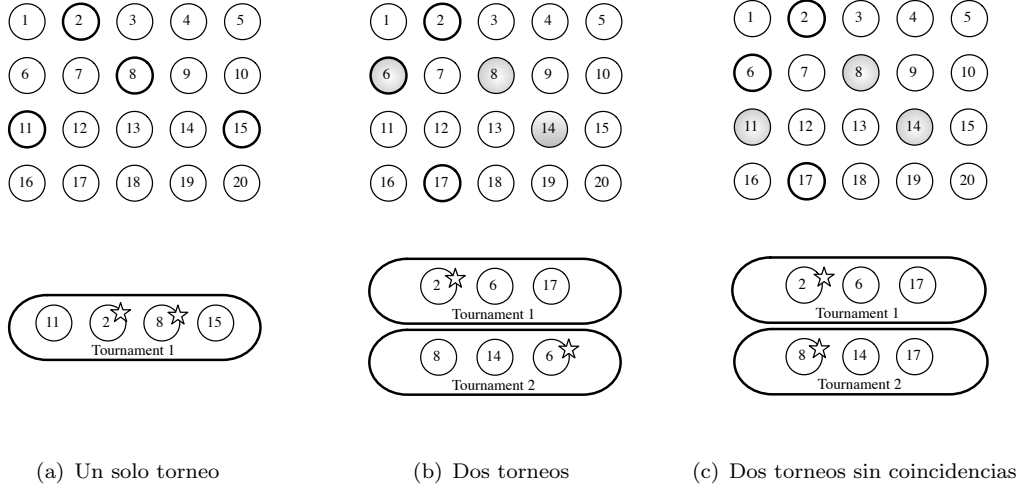


FIGURA 8.5: Selección por torneo

Un parámetro de especial importancia a definir sería el tamaño del torneo o *tour*, el cual podrá tomar valores que van desde 2 hasta el número de individuos de la población total. Ambos extremos no se consideran adecuados; el inferior porque se convertiría la selección en una selección totalmente aleatoria; y el superior porque se convertiría en una selección por *elitismo*, donde los mejores individuos serían siempre escogidos.

#### 8.2.4.2. Método de selección proporcional a la función de evaluación

Se trata de un método de selección basado en la ruleta sesgada, donde a cada individuo, *ind*, se le asigna una probabilidad de ser seleccionado,  $p_{ind}$ , que es proporcional a su *fitness*; ver ecuación (8.3).

$$fitness_{ind} = \left( \frac{1}{cost_{ind}} \right)^{ElitismFactor} \quad (8.2)$$

$$p_{ind} = \frac{fitness_{ind}}{\sum_{\forall ind} fitness_{ind}} \quad (8.3)$$

Según este procedimiento, los individuos bien adaptados se escogerán con mayor probabilidad, mientras que los peor adaptados sólo se escogerán de vez en cuando; además cuanto más alto es el *fitness* de los individuos bien adaptados, mayor será la

discriminación de los peor adaptados. Para evitar este fenómeno se ha introducido un factor llamado *ElitismFactor* que permitirá acentuar o relajar dicha diferencia en las probabilidades de los individuos. Si  $0 < \text{ElitismFactor} < 1$ , se relajará la diferencia entre los individuos, siendo el valor extremo 0 el que lleva a una selección con probabilidad uniforme; si  $\text{ElitismFactor} > 1$  entonces se irá potenciando la diferencia entre la probabilidad de elegir a los mejores adaptadores respecto al resto de la población, siendo una selección elitista para valores elevados del factor, donde siempre se escogería al individuo mejor adaptado. La Figura 8.6 muestra cómo varía la probabilidad de selección de 10 individuos alterando el valor de *ElitismFactor*.

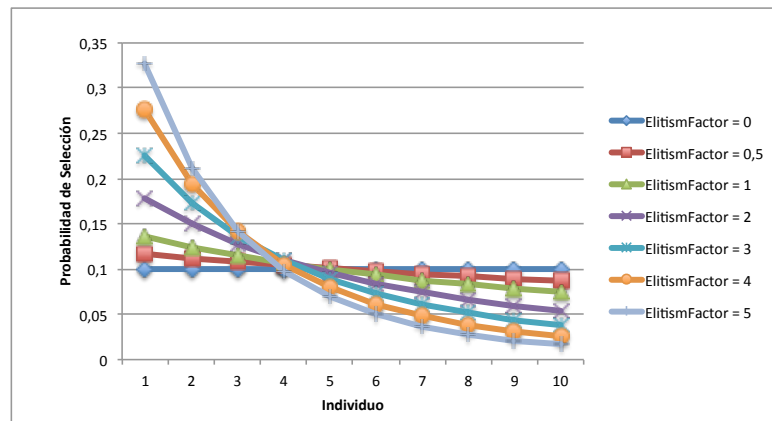


FIGURA 8.6: Selección proporcional a la función de evaluación

#### 8.2.4.3. Selección proporcional al rango del individuo

En la selección proporcional al rango se produce una repartición más uniforme de la probabilidad de selección. Los individuos son ordenados según su *fitness* de menor a mayor y se les asigna un *rango* que va desde 1 hasta  $\lambda$ ; entonces a cada individuo se le asigna una probabilidad de ser seleccionado en la ruleta sesgada igual a:

$$p_{ind} = \frac{\text{rango}(\text{fitness}_{ind})}{\lambda(\lambda + 1)/2} \quad (8.4)$$

Se trata pues, de otra de las maneras de superar el problema relacionado con la rápida convergencia proveniente de los *superindividuos*. Se considera un superindividuo a aquel individuo con una adaptación al problema muy superior al resto, que a medida que avanza el algoritmo “dominan” a la población. Con este tipo de selección se pretende que dichos superindividuos no lleguen a dominar a la población. Podría decirse que se trata de un medio de selección estático donde las probabilidades de selección permanecen constantes. Un ejemplo del reparto de probabilidades puede verse en la Figura 8.7.

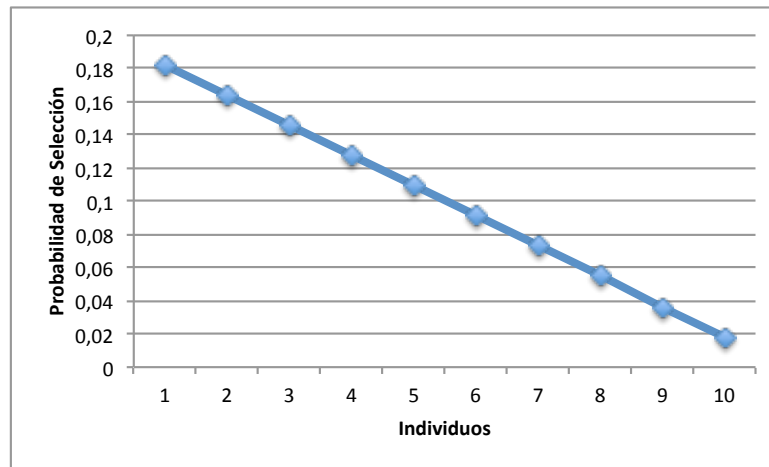


FIGURA 8.7: Selección proporcional al rango del individuo

### 8.2.5. Operadores de cruce

El operador de cruce cambia una porción de material genético entre los cromosomas de los padres. Esta acción es una operación probabilística controlada por un factor de probabilidad predefinido,  $P_{cross}$ , llamado probabilidad de cruce.

Los cromosomas de un par de padres, los cuales han sido seleccionados según algún procedimiento del epígrafe anterior, serán cruzados para de ese modo obtener nuevos individuos, hijos, generados a partir de ellos.

Existen numerosos métodos de cruce, a continuación se explicará detalladamente cada uno de los desarrollados en este trabajo. Para comprender dichos métodos se procederá a la explicación de los mismos, mostrándose ejemplos numéricos que facilitan el entendimiento tomados de [Larrañaga et al. \(1999\)](#).

1	2	3	4	5	6	7	8	PARENT 1
2	4	6	8	7	5	3	1	PARENT 2

FIGURA 8.8: Ejemplos de padres

#### 8.2.5.1. Operador de cruce basado en una correspondencia parcial (PMX)

El operador de cruce basado en una correspondencia parcial, *partially-mapped crossover* (PMX), fue propuesto por [Goldberg y Lingle Jr \(1985\)](#). Este operador mapea una porción de la ristra de genes de uno de los progenitores sobre el otro progenitor, intercambiándose la información restante.

Por ejemplo, considerando los dos padres representados en la Figura 8.8, el operador de cruce PMX selecciona dos puntos de cruce aleatorios situados en la misma posición para ambos padres; supónganse los genes cuarto y sexto (ver para el ejemplo la Figura 8.9). Una vez definidos los puntos de cruce, la ristra de genes existentes entre ambos serán la porción de cromosomas que se intercambiarán los padres, habiendo una correspondencia biunívoca entre los elementos que forman parte de las subristras comprendidas entre los puntos de corte. Seguidamente, el descendiente 1 copia los elementos restantes del padre 1 y de igual forma para el descendiente 2. En el caso de que una tarea esté ya presente en el descendiente, se reemplaza teniendo en cuenta la correspondencia existente en el mapeado inicial, es decir:  $4 \leftrightarrow 8$ ,  $5 \leftrightarrow 7$ ,  $6 \leftrightarrow 5$ . En el ejemplo, como la tarea 7 ya existe en el hijo 1, siguiendo la correspondencia existente ( $7 \rightarrow 5 \rightarrow 6$ ) se cambiará por la tarea 6; de igual modo en el hijo 2 como la tarea 4 y 6 ya existen, se cambiarían por las tareas 8 ( $4 \rightarrow 8$ ) y 7 ( $6 \rightarrow 5 \rightarrow 7$ ) respectivamente.

1	2	3	4	5	6	7	8	PARENT 1
2	4	6	8	7	5	3	1	PARENT 2
.	.	.	8	7	5	.	.	OFFSPRING 1
.	.	.	4	5	6	.	.	OFFSPRING 2
1	2	3	8	7	5	5	4	OFFSPRING 1
2	8	7	4	5	6	3	1	OFFSPRING 2

FIGURA 8.9: Operador de cruce PMX

#### 8.2.5.2. El operador de cruce basado en ciclos (CX)

El operador de cruce basado en ciclos, *Cycle crossover* (CX), fue propuesto por [Oliver et al. \(1987\)](#). Este operador crea un descendiente eligiendo para cada gen el gen de alguno de los padres.

Suponiendo los progenitores mostrados en la Figura 8.8 se escoge el primer elemento del descendiente o bien del progenitor 1 o del progenitor 2, siendo la elección de uno u otro realizada de forma aleatoria. En el ejemplo la elección deberá realizarse entre la tarea 1 o la tarea 2; supóngase que se escoge la tarea 1. A partir de aquí se debe cerrar el ciclo para evitar que el descendiente tenga tareas repetidas, en el ejemplo, el gen octavo debe elegir aleatoriamente entre la tarea 8 y la tarea 1, y como la tarea 1 existe ya en el descendiente se fuerza la elección a la tarea 8. De igual forma en el cuarto

gen se fuerza la elección a la tarea 4 y en el gen segundo a la tarea 2, cerrándose en el primer ciclo. Una vez concluido dicho ciclo, se considera a continuación el siguiente gen del descendiente que todavía no haya sido asignado, en el ejemplo el gen tercero. Dicho elemento puede ser escogido de cualquiera de los padres; suponiéndose que se escoge del segundo progenitor, implica que los genes quinto, sexto y séptimo serán asociados al segundo progenitor. La secuencia de formación del descendiente 1 se muestra en la Figura 8.10, donde han intervenido dos ciclos. El descendiente 2 es el complementario del descendiente 1.

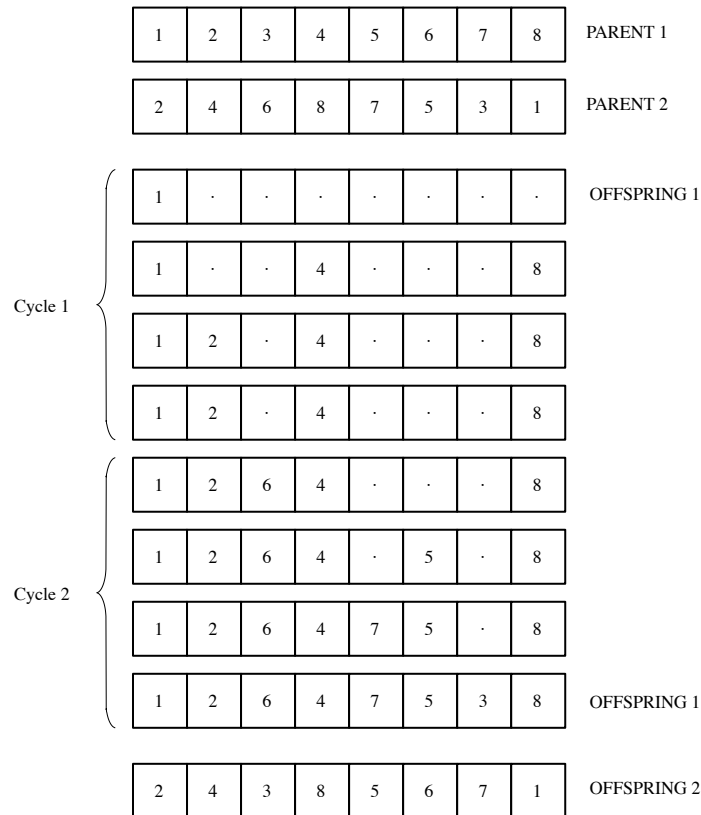


FIGURA 8.10: Operador de cruce CX

### 8.2.5.3. Operador de cruce por orden (OX1)

El operador de cruce por orden, *order crossover operator* (OX1), fue propuesto por Davis (1985). Este operador explota la importancia del orden en que aparecen las tareas.

Para construir un descendiente se elige una subruta de uno de los padres, preservando el orden relativo de las tareas del otro padre. Un ejemplo se muestra en la Figura 8.11, donde para elegir la subruta que permanecerá inalterada de un padre se han seleccionado dos genes al azar, en este caso el tercero y quinto. La subruta com-



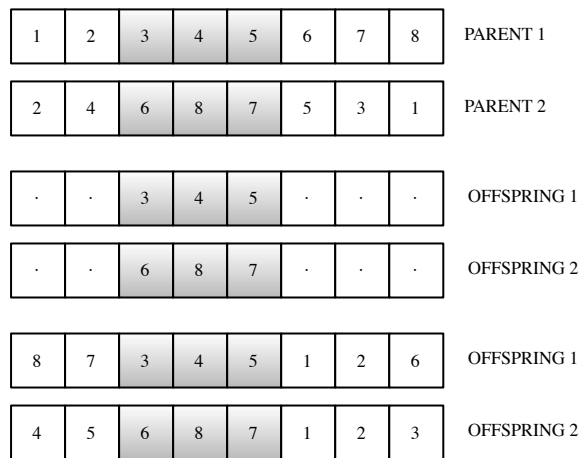


FIGURA 8.11: Operador de cruce OX1

prendida entre dichos genes se preservará, y empezando por el segundo punto de corte el resto de tareas se copian en el orden en que aparecen en el otro padre, omitiéndose las tareas ya existentes; cuando se llega al final de la ristra de un padre, se continúa en su primera posición.

#### 8.2.5.4. Operador de cruce basado en el orden (OX2)

El operador de cruce basado en el orden, *order based crossover operator* (OX2), fue propuesto por Syswerda (1991). Dicho operador selecciona al azar varios genes e impone el orden de las tareas que componen dichos genes en uno de los padres en los genes del otro progenitor.

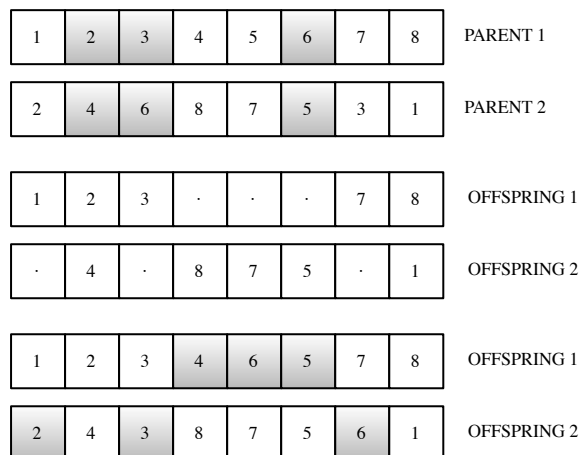


FIGURA 8.12: Operador de cruce OX2

Suponiendo los mismos progenitores que en los ejemplos anteriores, y que se

seleccionan los genes segundo, tercero y sexto. Los elementos en dichos genes son las tareas 2 – 3 – 6 en el primer progenitor, y las tareas 4 – 6 – 5 en el segundo. En el primer padre, las tareas 4 – 6 – 5 aparecen en los genes cuarto, quinto y sexto; el descendiente coincidirá con el primer padre si exceptuamos dichas posiciones, que serán reordenadas en el orden que aparecen en el segundo progenitor. En el caso del segundo padre, las tareas 2 – 3 – 6 aparecen en la primera, tercera y séptima posición, que serán reordenadas según aparecen en el progenitor uno. Todo el proceso se muestra en la Figura 8.12.

#### 8.2.5.5. Operador de cruce basado en posición (POS)

El operador de cruce basado en la posición, *position based operator* (POS), fue propuesto por Syswerda (1991). Al igual que el operador OX2 comienza seleccionando al azar un conjunto de genes en los progenitores, que luego se imponen en el otro progenitor.

Supóngase que se seleccionan los genes segundo, tercero y sexto; entonces en el descendiente 2 se copian las tareas que aparecen en el progenitor 1 y viceversa. El resto de posiciones aparecen según el orden del progenitor correspondiente, evitando la repetición de tareas. El proceso se muestra en la Figura 8.13.

1	2	3	4	5	6	7	8	PARENT 1
2	4	6	8	7	5	3	1	PARENT 2
.	4	6	.	.	5	.	.	OFFSPRING 1
.	2	3	.	.	6	.	.	OFFSPRING 2
1	4	6	2	3	5	7	8	OFFSPRING 1
4	2	3	8	7	6	5	1	OFFSPRING 2

FIGURA 8.13: Operador de cruce POS

#### 8.2.6. Operadores de mutación

El operador de mutación se aplica de manera individual a los individuos seleccionados, consistiendo en la alteración aleatoria de parte del material genético del mismo. La probabilidad con la que el operador actúa es definida como  $P_{mutation}$ , y en el caso particular del algoritmo aquí implementado tendrá una probabilidad  $P_{mutation} = 1 - P_{cross}$ . Este hecho ha sido forzado para evitar generaciones en las que ningún operador se aplica sobre la población.

El operador de mutación generalmente suele actuar con menor probabilidad que el operador de cruce, lo cual se suele justificar señalando que los operadores de cruce proporcionan una rápida exploración del espacio de búsqueda mientras que el operador de mutación asegura que ningún punto del espacio de soluciones tenga probabilidad nula de ser examinado. Además, al GA propuesto en este trabajo se le ha dotado de otros mecanismos que evitan la caída prematura en óptimos locales y que serán explicados en el epígrafe 8.2.7.

Cuatro han sido los operadores de mutación implementados, los cuales son explicados a continuación.

#### 8.2.6.1. Operador de mutación basado en la mezcla (SM)

El Operador de mutación basado en la mezcla (Syswerda, 1991), *scramble mutation operator* (SM), selecciona una subristra al azar y a continuación cambia el orden de las tareas que la componen.

La Figura 8.14 ejemplifica dicho operador de forma gráfica; la subristra seleccionada es la formada por las tareas 3 – 4 – 5 – 6, las cuales, tras aplicar el operador, son ordenadas de la forma 5 – 3 – 6 – 4 dando por consiguiente el individuo mutado.

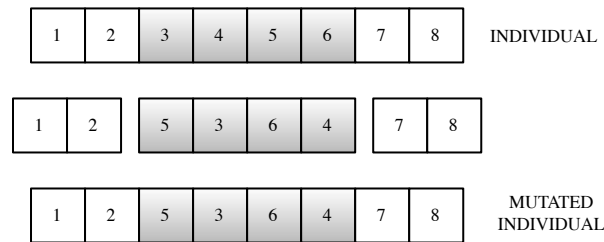


FIGURA 8.14: Operador de mutación SM

#### 8.2.6.2. Operador de mutación basado en la inserción (ISM)

El operador de mutación basado en la inserción (Fogel, 1988; Michalewicz, 1992), *insertion mutation operator* (ISM), escoge aleatoriamente una tarea en la ristra de tareas del individuo, para a continuación extraer dicha tarea de la ristra, e insertarla en un lugar seleccionado al azar.

En el ejemplo de la Figura 8.15 se ha seleccionado al azar la tarea 3 para insertarla entre los genes 6 y 7.

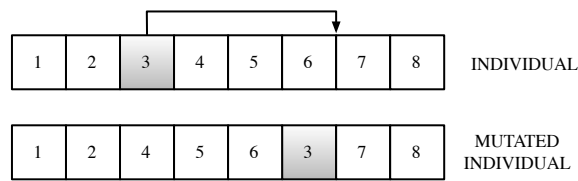


FIGURA 8.15: Operador de mutación ISM

### 8.2.6.3. Operador de mutación basado en el intercambio (EM)

El operador de mutación basado en el intercambio ([Banzhaf, 1990](#)), *exchange mutation operator* (EM), selecciona al azar dos tareas en la ristra de tareas del individuo en cuestión y permuta sus posiciones.

La Figura 8.16 ejemplifica dicho operador donde los genes tercero y sexto son los seleccionados para el intercambio.

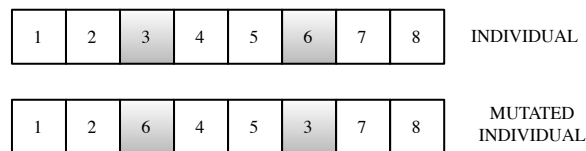


FIGURA 8.16: Operador de mutación EM

### 8.2.6.4. Operador de mutación basado en desplazamientos (DM)

El operador basado en el desplazamiento ([Michalewicz, 1992](#)), *displacement mutation operator* (DM), comienza seleccionando una subristra del individuo al azar, la cual será insertada posteriormente en un lugar aleatorio.

En la Figura 8.17 se han seleccionado al azar la subristra 3 – 4 – 5, la cual se ha insertado aleatoriamente entre los genes 7 y 8.

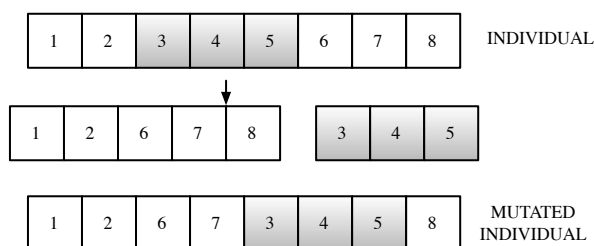


FIGURA 8.17: Operador de mutación DM

### 8.2.7. Mecanismos de diversificación

Como ya se ha comentado en varias ocasiones a lo largo de la explicación del GA, uno de los problemas que con más frecuencia hay que solucionar en este tipo de algoritmos es su rápida convergencia hacia óptimos locales, teniendo que ser una preocupación del diseñador del algoritmo el evitar tal circunstancia.

El problema de la convergencia prematura, surge a menudo cuando la selección de individuos se realiza de manera proporcional a su función de evaluación. En tal caso, pueden existir individuos con una adaptación al problema muy superior al resto, que a medida que avanza el algoritmo dominan a la población y se erigen como posibles soluciones a nuestro problema.

Diferentes mecanismos han sido considerados en la codificación del GA propuesto para evitar esta rápida convergencia: el denominado *ElitismFactor*, diferentes mecanismos de selección, y diferentes mecanismos de repoblación. Cuatro posibilidades han sido contempladas en la repoblación:

- No considerar ningún mecanismo de repoblación
- Eliminar los individuos repetidos. Si tras aplicar los operadores de cruce y mutación se obtiene un individuo existente en la población, se genera aleatoriamente un nuevo individuo.
- Reiniciar la población, a excepción del mejor individuo, si el *fitness* medio de la población es cercano al *fitness* del mejor individuo.
- Reiniciar la población a excepción del mejor individuo, si el mejor individuo se repite un número determinado de veces.

Existen otros mecanismos de diversificación que no han sido considerados en la implementación del GA propuesto en este trabajo, uno a destacar sería la idea de *especies de organismos* (Goldberg y Richardson, 1987). La idea parte de evitar individuos parecidos en la población, para tal fin se modifica la función objetivo de cada individuo devaluando el *fitness* de individuos cercanos.

### 8.2.8. Procedimiento de parametrización del algoritmo genético

Los GAs presentan un elevado número de posibilidades y variantes que hay que definir y parametrizar adecuadamente para hacer que este funcione según lo esperado. Esto hace que el GA presente una gran flexibilidad, aunque convierte su parametrización en una ardua tarea.

En un principio podría pensarse que para elegir entre las diferentes posibilidades y seleccionar los parámetros más adecuados bastaría con testear todas las posibilidades en la batería de problemas que se muestra en el Apéndice A. Centrando la atención sólo en un problema en particular, por ejemplo el problema R1.1 para 50 clientes, y teniendo en cuenta que se han codificado 5 tipos de selección, 5 tipos de cruce, 4 tipos de mutación, y 4 tipos de mecanismos de repoblación se estaría hablando un total de 400 variantes distintas. Si ahora se tiene en cuenta que estas variantes tienen parámetros internos que definir se multiplicarían las variantes a testear, por ejemplo considerando sólo la probabilidad de cruce y mutación el número de variantes se elevaría a 8.000. Si esto se extiende a la idea de intentar analizar todas las variantes del GA en todos los problemas de la batería, sencillamente resultaría faraónico debido a que el tiempo de parametrización no resultaría razonable.

Por tanto, es necesario seguir un procedimiento alternativo de elección, que limite el número de pruebas a realizar y pueda llevar a un GA convenientemente ajustado. El procedimiento de parametrización llevado a cabo realiza un amplio conjunto de simulaciones del algoritmo, pero sin caer en el desorbitado volumen mostrado antes. Este ha consistido en un proceso secuencial en el que en cada uno de los pasos se dejó uno o dos grados de libertad y se fija el resto de variables; estas variables libres fueron testeadas y analizando los resultados se fueron seleccionando una serie de parámetros que quedarían fijados en los pasos sucesivos. Con dichas variables fijadas, se le da libertad a otras para seguir con el proceso. La secuencia de parametrización resumida consistiría en:

- Determinación de los operadores de cruce y mutación.
- Determinación de las probabilidades de cruce y mutación
- Determinación de los mecanismos de selección y de repoblación.

Para cada test se devolvía del algoritmo: el valor esperado de la solución, el tiempo de ejecución de la simulación, y la iteración en la que el algoritmo produjo su última mejora. Analizando estos valores, y siendo conscientes en cada caso de qué parámetros se han seleccionado para el algoritmo y qué instancia se está testeando, se podrán determinar las variantes y parámetros que sean más favorables para el problema del acarreo terrestre. Las pruebas se realizaron sobre las 12 instancias de la clase R1, para tres cantidades de tareas: 25, 50 y 100.

#### **8.2.8.1. Determinación de operadores de cruce y mutación**

El primer paso tuvo como objetivo elegir las mejores combinaciones de los métodos de cruce y mutación, de modo que se examinaron las 20 posibles combinaciones de ambos operadores. Se fijó, arbitrariamente, como método de selección la selección

proporcional a la función de evaluación; y como método de repoblación se eligió la generación aleatoria de un nuevo individuo si tras los operadores de cruce y mutación el individuo generado existe en la población.

Todas las combinaciones posibles fueron testeadas para unas probabilidades de cruce,  $P_{cross}$ , comprendidas entre 0.75 y 0.95, en intervalos de tamaño 0.05, y para unas probabilidad de mutación,  $P_{mutation}$ , que cumplieran la relación:

$$P_{mutation} = 1 - P_{cross} \quad (8.5)$$

Cada una de las posibles combinaciones anteriores se simuló 20 veces para las 12 instancias de la clase R1 con tres cantidades de tareas; esto permitió tener un total de 3.600 tests por cada par cruce-mutación. Un resumen de los resultados de todas estas simulaciones se muestra en la Tabla 8.1, que muestra la media de los costes mínimos, máximos y medios para los 3.600 test realizados sobre cada par cada par operador cruce-mutación.

TABLA 8.1: Determinación de los operadores de cruce y mutación

Media de los costes	Mutación	Cruce				
		PMX	CX	OX1	OX2	POS
Mínimos	SM	3.255,64	3.349,69	3.223,32	3.331,06	3.332,52
	EM	3.203,98	3.298,02	<b>3.171,65</b>	3.279,40	3.280,85
	ISM	<b>3.185,86</b>	3.279,90	<b>3.153,53</b>	3.261,27	3.262,73
	DM	3.249,41	3.343,45	3.217,08	3.324,83	3.326,28
Medios	SM	3.444,19	3.550,16	3.399,94	3.531,24	3.532,12
	EM	3.378,41	3.484,38	<b>3.334,16</b>	3.465,46	3.466,34
	ISM	<b>3.355,40</b>	3.461,36	<b>3.311,14</b>	3.442,44	3.443,32
	DM	3.425,26	3.531,22	3.381,00	3.512,30	3.513,18
Máximos	SM	3.643,23	3.759,71	3.584,46	3.740,76	3.740,68
	EM	3.561,82	3.678,30	<b>3.503,05</b>	3.659,35	3.659,27
	ISM	<b>3.531,87</b>	3.648,36	<b>3.473,10</b>	3.629,41	3.629,32
	DM	3.604,77	3.721,25	3.546,00	3.702,30	3.702,22

Analizando los resultados obtenidos los siguientes pares de operadores de cruce-mutación fueron seleccionados para seguir con la parametrización:

- PMX-ISM
- OX1-EM
- OX1-ISM

### 8.2.8.2. Determinación de las probabilidades de cruce y mutación

Una vez determinados los operadores de cruce y mutación más idóneos, se procedió a realizar unas simulaciones más exhaustivas de los mismos con el objeto de determinar las probabilidades de cruce y mutación más adecuadas para cada uno de dichos pares.

Se realizaron 100 simulaciones de los operadores anteriormente seleccionados en el rango de probabilidades de cruce entre 0,95 y 0, siendo la probabilidad de mutación complementaria a la de cruce como se comentó con anterioridad.

Un resumen de resultados es mostrado en las siguientes tablas. La Tabla 8.2 presenta la media de los resultados para todos los casos, marcándose en negrilla los mejores resultados encontrados. La Tabla 8.3 relaciona la media y la desviación de los resultados de la tabla anterior, marcándose nuevamente los mejores resultados. En este caso algunas relaciones  $P_{cross} - P_{mutation}$  han sido omitidas.

TABLA 8.2: Determinación de la probabilidad de cruce y mutación (I)

$P_{cross} - P_{mutation}$	Media de los costes máximos			Media de los costes medios (M)			Media de los costes mínimos		
	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM
0,95-0,05	3.123,60	3.053,69	3.039,57	2.920,19	2.871,70	2.868,14	2.730,99	2.694,66	2.697,29
0,90-0,10	3.081,72	3.036,72	3.040,85	2.883,19	2.867,00	2.862,87	2.697,23	2.690,09	2.693,49
0,85-0,15	3.037,03	3.038,99	3.023,76	2.859,84	2.866,11	2.854,87	2.682,00	2.697,50	2.685,46
0,80-0,20	3.022,80	3.031,41	3.025,45	2.849,19	2.863,18	2.849,54	2.691,92	2.705,52	2.682,92
0,75-0,25	3.012,12	3.033,15	3.017,00	2.840,92	2.862,63	2.849,37	2.685,14	2.696,49	2.678,78
0,70-0,30	2.995,65	3.030,40	3.009,52	2.837,31	2.862,47	2.844,00	2.676,80	2.697,53	2.676,89
0,65-0,35	3.004,81	3.036,91	3.000,31	2.833,67	2.860,87	2.839,68	<b>2.674,22</b>	2.703,88	2.676,92
0,60-0,40	2.993,70	3.040,76	3.003,41	<b>2.833,28</b>	2.866,19	2.838,39	2.675,31	2.708,13	2.680,38
0,55-0,45	2.995,35	3.030,63	2.998,08	2.835,06	2.864,03	2.839,13	2.674,35	2.696,59	2.685,20
0,50-0,50	<b>2.990,74</b>	3.028,47	3.008,37	2.835,07	2.864,10	2.837,76	2.674,04	2.700,00	2.683,45
0,45-0,55	<b>2.990,74</b>	3.033,61	3.004,89	2.834,67	2.868,04	2.837,67	2.682,29	2.706,53	2.679,19
0,40-0,60	3.006,16	3.032,83	3.001,21	2.840,55	2.869,23	2.838,42	2.686,95	2.708,46	2.681,42
0,35-0,65	2.991,32	3.037,76	2.998,29	2.841,74	2.874,11	2.837,16	2.690,15	2.708,48	2.678,73
0,30-0,70	3.000,07	3.033,85	3.000,80	2.843,33	2.875,42	2.840,53	2.692,72	2.715,93	2.692,26
0,25-0,75	3.002,82	3.034,94	3.005,38	2.845,85	2.876,15	2.843,87	2.686,14	2.721,37	2.684,01
0,20-0,80	3.014,48	3.033,19	2.997,44	2.851,16	2.879,89	2.847,43	2.697,38	2.729,57	2.692,46
0,15-0,85	3.005,98	3.043,24	3.000,55	2.851,94	2.882,80	2.850,65	2.699,28	2.725,75	2.696,37
0,10-0,90	3.018,19	3.043,77	3.017,36	2.858,20	2.886,35	2.856,41	2.702,38	2.715,71	2.700,99

TABLA 8.3: Determinación de la probabilidad de cruce y mutación (II)

$P_{cross} - P_{mutation}$	Desviación de los costes (D)			M+1D			M+2D		
	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM
0,70-0,30	51,20	52,85	52,00	2.888,51	2.915,31	2.896,00	2.939,71	2.968,16	2.948,00
0,65-0,35	53,08	53,08	52,02	2.886,74	2.913,95	2.891,70	2.939,82	2.967,02	2.943,72
0,60-0,40	50,76	52,64	51,07	<b>2.884,05</b>	2.918,83	2.889,46	2.934,81	2.971,47	2.940,53
0,55-0,45	50,26	51,78	51,03	2.885,33	2.915,81	2.890,16	2.935,59	2.967,59	2.941,19
0,50-0,50	<b>49,59</b>	51,65	50,68	2.884,66	2.915,75	2.888,44	<b>2.934,26</b>	2.967,40	2.939,12
0,45-0,55	49,80	51,61	50,50	2.884,47	2.919,65	2.888,17	2.934,27	2.971,26	2.938,68
0,40-0,60	50,80	51,18	50,56	2.891,35	2.920,41	2.888,98	2.942,15	2.971,59	2.939,53



Atendiendo a los resultados, es fácil comprobar que el algoritmo genético con operador de cruce PMX y operador de mutación ISM es el que mejor se comporta con la batería de problemas genérica, siendo las relaciones  $P_{cross} - P_{mutation}$  de 0,6 – 0,4 y de 0,5 – 0,5 las más adecuadas.

Se consideró oportuno comprobar el comportamiento de las diferentes variantes del algoritmo no sólo en el caso de la batería genérica, compuesta por 36 problemas de diferentes tamaños, sino en las baterías particularizadas a cada tamaño de población en concreto. El resumen de los resultados para los casos de problemas con un tamaño de 25, 50 y 100 tareas son mostrados en las Tablas 8.4, 8.5 y 8.6.

Como se puede observar en la 8.4 para instancias con un tamaño pequeño la variante PMX-ISM con probabilidades de cruce y mutación de 0,5 es la que alcanza de media los resultados mínimos. Es interesante también destacar el rendimiento de la variante OX1-EM con probabilidad de cruce 0,2 y probabilidad de mutación 0,8, que destaca en los costes medios de las soluciones alcanzadas.

TABLA 8.4: Determinación de la probabilidad de cruce y mutación - 25 Tareas

$P_{cross} - P_{mutation}$	Media de los costes máximos			Media de los costes medios (M)			Media de los costes mínimos		
	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM
0,95-0,05	1.184,10	1.169,93	1.165,19	1102,11	1085,46	1086,51	1024,80	1011,20	1012,03
0,90-0,10	1.166,55	1.160,71	1.167,90	1088,89	1082,54	1084,93	1016,48	1009,60	1017,23
0,85-0,15	1.171,83	1.156,50	1.163,48	1083,96	1081,22	1083,05	1011,54	1011,70	1012,30
0,80-0,20	1.158,74	1.153,58	1.158,69	1080,28	1078,17	1078,91	1013,24	1006,02	1005,01
0,75-0,25	1.158,16	1.153,94	1.153,67	1077,97	1078,91	1080,01	1007,23	1009,48	1009,01
0,70-0,30	1.149,35	1.154,36	1.155,20	1075,62	1075,87	1077,08	1006,98	1013,57	1006,03
0,65-0,35	1.143,25	1.146,91	1.158,90	1073,22	1074,71	1076,61	1008,96	1011,37	1012,16
0,60-0,40	1.146,22	1.150,30	1.150,57	1073,53	1075,61	1075,60	1004,38	1010,05	1010,72
0,55-0,45	1.150,64	1.143,98	1.147,25	1073,74	1074,71	1074,41	1008,98	1015,99	1006,23
0,50-0,50	1.147,06	1.142,80	1.147,31	1072,24	1072,92	1074,11	<b>1001,32</b>	1009,88	1007,33
0,45-0,55	1.144,91	1.146,56	1.154,53	1072,40	1072,98	1074,84	1002,68	1008,95	1007,86
0,40-0,60	1.150,17	1.143,03	1.140,82	1074,86	1072,25	1073,59	1013,40	1011,62	1008,48
0,35-0,65	1.151,96	1.141,91	1.144,43	1073,49	1073,83	1072,71	1011,43	1011,54	1005,32
0,30-0,70	1.149,36	1.139,94	1.148,23	1073,43	1073,63	1071,97	1010,86	1016,98	1007,12
0,25-0,75	1.147,58	1.137,16	1.142,38	1074,80	1072,31	1073,85	1002,27	1012,82	1009,43
0,20-0,80	1.150,08	1.137,36	1.147,59	1073,28	<b>1071,19</b>	1074,55	1004,11	1007,93	1004,50
0,15-0,85	1.145,22	<b>1.140,08</b>	1.140,90	1074,65	1073,02	1072,72	1008,85	1013,51	1003,30
0,10-0,90	1.151,10	1.141,45	1.148,14	1076,03	1072,82	1074,28	1012,25	1012,44	1005,15
0,05-0,95	1.144,40	1.141,62	1.149,30	1074,57	1074,79	1075,68	1012,18	1012,34	1011,12
0,00-1,00	1.150,87	1.140,38	1.143,21	1077,34	1073,81	1076,19	1008,81	1017,77	1007,83

El caso de las instancias de tamaño 50 tareas mostrado en la Tabla 8.5 no ha aportado mayor información que el caso general, destacando las variantes ya comentadas con anterioridad, como es el caso de PMX-ISM (0.6 - 0.4).

La Tabla 8.6 muestra los resultado de las simulaciones en instancias de tamaño 100 tareas, que señalan a la variante OX1-ISM con una relación de probabilidad de cruce y mutación 0,65-0,35 como una combinación interesante para seguir con en el proceso de parametrización.

TABLA 8.5: Determinación de la probabilidad de cruce y mutación - 50 Tareas

$P_{cross} -$ $P_{mutation}$	Media de los costes máximos			Media de los costes medios (M)			Media de los costes mínimos		
	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM
0,95-0,05	2.678,11	2.608,76	2.603,69	2478,27	2447,45	2444,73	2302,60	2285,22	2282,77
0,90-0,10	2.632,74	2.593,73	2.602,96	2450,14	2444,08	2438,91	2266,85	2266,84	2288,46
0,85-0,15	2.587,61	2.607,37	2.579,16	2429,60	2441,77	2436,54	2251,39	2282,40	2282,22
0,80-0,20	2.580,68	2.594,58	2.599,55	2423,55	2438,08	2429,14	2273,66	2283,16	2282,31
0,75-0,25	2.576,65	2.598,87	2.591,93	2414,71	2438,07	2428,71	2267,71	2273,94	2255,89
0,70-0,30	2.550,32	2.589,56	2.575,28	2412,19	2435,89	2422,65	2259,83	2269,63	2264,59
0,65-0,35	2.569,26	2.602,25	2.563,93	2408,85	2435,60	2416,82	2259,50	2272,55	2265,72
0,60-0,40	2.550,95	2.602,72	2.574,76	<b>2407,54</b>	2439,12	2415,32	<b>2249,34</b>	2272,38	2262,20
0,55-0,45	2.557,10	2.585,84	2.561,92	2408,70	2437,07	2414,06	2253,15	2272,57	2269,87
0,50-0,50	2.564,21	2.589,32	2.572,81	2413,33	2435,13	2417,69	2257,03	2278,15	2262,96
0,45-0,55	<b>2.546,29</b>	2.577,30	2.562,82	2410,16	2436,18	2410,85	2252,71	2288,18	2258,04
0,40-0,60	2.568,15	2.591,02	2.568,35	2412,59	2439,91	2418,36	2268,47	2292,63	2263,48
0,35-0,65	2.557,48	2.583,34	2.557,94	2413,84	2439,29	2410,95	2267,68	2279,86	2264,81
0,30-0,70	2.566,99	2.574,23	2.566,78	2413,59	2440,30	2414,16	2260,40	2285,35	2271,35
0,25-0,75	2.577,52	2.586,85	2.567,01	2418,27	2440,58	2414,35	2263,56	2301,09	2254,46
0,20-0,80	2.566,78	2.582,45	2.556,05	2422,10	2444,26	2420,78	2274,09	2304,56	2281,79
0,15-0,85	2.562,04	2.575,66	2.560,73	2417,00	2440,35	2419,79	2282,70	2282,97	2282,79
0,10-0,90	2.565,96	2.581,74	2.572,55	2422,50	2441,62	2421,67	2279,46	2269,34	2279,34
0,05-0,95	2.578,88	2.583,54	2.565,11	2424,71	2444,09	2425,50	2267,66	2291,98	2279,44
0,00-1,00	2.578,59	2.583,55	2.580,97	2431,63	2445,31	2433,50	2286,14	2286,32	2278,55

TABLA 8.6: Determinación de la probabilidad de cruce y mutación - 100 Tareas

$P_{cross} -$ $P_{mutation}$	Media de los costes máximos			Media de los costes medios (M)			Media de los costes mínimos		
	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM	PMX-ISM	OX1-EM	OX1-ISM
0,95-0,05	5.508,60	5.382,38	5.349,81	5180,19	5082,20	5073,17	4865,57	4787,57	4797,05
0,90-0,10	5.445,87	5.355,71	5.351,69	5110,54	5074,36	5064,77	4808,37	4793,84	4774,77
0,85-0,15	5.351,66	5.353,11	5.328,63	5065,95	5075,35	5045,04	4783,06	4798,41	4761,86
0,80-0,20	5.329,00	5.346,07	5.318,10	5043,74	5073,28	5040,56	4788,86	4827,37	4761,43
0,75-0,25	5.301,56	5.346,62	5.305,38	5030,09	5070,91	5039,40	4780,47	4806,04	4771,44
0,70-0,30	5.287,27	5.347,28	5.298,09	5024,12	5075,64	5032,28	4763,59	4809,40	4760,07
0,65-0,35	5.301,92	5.361,58	5.278,11	5018,93	5072,29	5025,60	4764,19	4827,73	<b>4752,88</b>
0,60-0,40	5.283,91	5.369,26	5.284,88	<b>5018,78</b>	5083,84	5024,24	4762,21	4841,97	4768,24
0,55-0,45	5.278,31	5.362,08	5.285,06	5022,75	5080,29	5028,93	4760,93	4801,21	4779,50
0,50-0,50	<b>5.260,94</b>	5.353,29	5.305,00	5019,65	5084,24	5021,49	4761,76	4811,97	4780,05
0,45-0,55	5.281,01	5.376,96	5.297,32	5021,46	5094,96	5027,32	4791,47	4822,45	4771,66
0,40-0,60	5.300,17	5.364,45	5.294,44	5034,19	5095,54	5023,30	4778,99	4821,14	4772,31
0,35-0,65	5.264,50	5.388,04	5.292,50	5037,90	5109,21	5027,81	4791,34	4834,04	4766,06
0,30-0,70	5.283,86	5.387,38	5.287,37	5042,96	5112,34	5035,47	4806,90	4845,45	4798,32
0,25-0,75	5.283,38	5.380,82	5.306,76	5044,48	5115,56	5043,41	4792,58	4850,21	4788,14
0,20-0,80	5.326,59	5.379,75	5.288,69	5058,10	5124,23	5046,95	4813,95	4876,20	4791,08
0,15-0,85	5.310,69	5.413,99	5.300,03	5064,16	5135,02	5059,43	4806,29	4880,78	4803,03
0,10-0,90	5.337,50	5.408,12	5.331,40	5076,07	5144,62	5073,29	4815,42	4865,34	4818,49
0,05-0,95	5.327,16	5.390,81	5.335,54	5083,68	5150,31	5073,57	4812,39	4891,85	4802,71
0,00-1,00	5.357,51	5.433,38	5.351,81	5102,06	5167,29	5090,49	4856,46	4896,18	4846,17

Resumiendo los resultados alcanzados hasta ahora se tiene que las variantes que seguirán analizándose serán:

- Cruce PMX - Mutación ISM:  $P_{cross} = 0,60$  y  $P_{mutation} = 0,40$ .
- Cruce PMX - Mutación ISM:  $P_{cross} = 0,50$  y  $P_{mutation} = 0,50$ .
- Cruce OX1 - Mutación ISM:  $P_{cross} = 0,65$  y  $P_{mutation} = 0,35$ .
- Cruce OX1 - Mutación EM:  $P_{cross} = 0,20$  y  $P_{mutation} = 0,80$ .

### 8.2.8.3. Determinación de los mecanismos de selección y de caída en óptimos locales

Una vez identificados los mejores métodos de cruce y mutación, con sus respectivas probabilidades, es necesario fijar el método de selección idóneo para el algoritmo, así como mecanismos que eviten la caída del algoritmo en óptimos locales.

Se generaron todas las combinaciones posibles de los cinco tipos de selección (Ver epígrafe 8.2.4), y de los cuatro posibles mecanismos de repoblación (Ver epígrafe 8.2.7). Estas combinaciones fueron simuladas para los cuatro casos más ventajosos escogidos en el epígrafe anterior.

Con el objeto de facilitar la posterior interpretación de las tablas de resultados, los tipos de selección y los mecanismos de repoblación serán nombrados en lo que sigue a partir de los acrónimos de la Tabla 8.7.

TABLA 8.7: Acrónimos de los tipos de selección y mecanismos de repoblación

Acrónimo	Operador	Descripción
T1	Selección	Un torneo
T2s	Selección	Dos torneos sin coincidencia
T2	Selección	Dos torneos
PFO	Selección	Proporcional a la función objetivo
PR	Selección	Proporcional al rango
NI	Repoblación	Nuevo individuo aleatorio si repetido
NPm	Repoblación	Nueva población si el <i>fitness</i> medio se aproxima al mejor
NPr	Repoblación	Nueva población si existen más de $x$ elementos repetidos
SR	Repoblación	Sin Repoblación

Los resultados son mostrados en las siguientes tablas. Las Tablas 8.8 y 8.9 muestran los resultados para los 36 test realizados en 3 tamaños de instancias distintas; las Tablas 8.10 y 8.11 particularizan los test en instancias de 25 tareas; las Tablas 8.12 y 8.13 para el caso de instancias de 50 tareas; y por último las Tablas 8.14 y 8.15 para el caso de 100 tareas.

TABLA 8.8: Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (I)

Repoblación	Selección	Media de los costes mínimos				Media de los costes máximos			
		PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8	PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8
NI	T1	2.610,92	2.612,28	2.613,42	2.623,94	2.851,11	2.854,81	2.840,27	2.864,69
	T2s	2.538,29	<b>2.530,62</b>	2.535,33	2.555,91	2.767,65	<b>2.753,20</b>	2.774,81	2.784,22
	T2	2.545,96	2.542,41	2.542,41	2.556,08	2.770,89	2.762,66	2.780,91	2.794,66
	PFO	2.705,67	2.711,66	2.710,38	2.734,29	2.952,46	2.963,30	2.959,15	2.997,16
	PR	3.117,70	3.094,53	3.062,82	3.117,55	3.485,60	3.454,09	3.411,49	3.481,68
NPm	T1	2.934,27	2.917,38	2.953,01	3.012,61	3.371,18	3.334,11	3.358,91	3.434,53
	T2s	2.741,04	2.722,66	2.761,52	2.823,82	3.092,61	3.035,98	3.110,54	3.147,85
	T2	2.778,80	2.736,34	2.789,71	2.828,50	3.118,32	3.066,19	3.118,50	3.174,86
	PFO	2.990,04	2.977,74	3.012,01	3.048,16	3.464,23	3.414,11	3.485,29	3.522,56
	PR	3.570,24	3.558,29	3.514,18	3.513,95	4.038,70	4.060,01	4.036,88	4.013,73
NPr	T1	2.636,46	2.622,63	2.628,24	2.664,43	2.908,76	2.879,25	2.909,96	2.941,62
	T2s	2.598,77	2.574,08	2.603,96	2.636,07	2.874,01	2.825,50	2.861,91	2.906,72
	T2	2.601,18	2.587,63	2.621,20	2.647,78	2.874,02	2.835,76	2.875,35	2.921,04
	PFO	2.705,60	2.707,48	2.712,16	2.726,31	2.965,75	2.966,12	2.981,45	3.005,74
	PR	3.042,59	3.047,94	3.016,82	3.060,32	3.400,02	3.391,71	3.339,05	3.377,40
SR	T1	2.592,83	2.596,77	2.602,80	2.622,87	2.839,92	2.837,75	2.851,94	2.877,61
	T2s	2.556,98	2.539,47	2.557,89	2.599,91	2.791,99	2.768,25	2.821,75	2.875,38
	T2	2.562,38	2.540,46	2.563,20	2.596,61	2.796,22	2.768,15	2.813,29	2.886,04
	PFO	2.660,69	2.683,80	2.688,45	2.696,57	2.926,01	2.939,83	2.933,31	2.967,94
	PR	3.045,99	3.037,11	3.023,62	3.048,77	3.388,42	3.374,33	3.369,64	3.385,21

TABLA 8.9: Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (II)

Repoblación	Selección	Media de los costes medios				Media de las desviaciones			
		PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8	PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8
NI	T1	2.723,89	2.726,94	2.728,23	2.741,46	46,45	47,95	47,55	48,81
	T2s	2.653,37	<b>2.644,81</b>	2.659,27	2.668,59	48,72	<b>45,09</b>	47,62	48,84
	T2	2.659,19	2.650,42	2.666,79	2.676,54	46,30	45,53	49,39	46,04
	PFO	2.830,74	2.835,33	2.841,11	2.860,26	48,27	50,24	50,17	53,11
	PR	3.304,56	3.275,96	3.245,96	3.304,26	70,93	68,28	67,93	72,92
NPm	T1	3.146,61	3.113,84	3.151,95	3.207,68	85,97	83,84	81,42	86,32
	T2s	2.908,28	2.874,12	2.931,96	2.985,17	64,96	62,30	66,67	67,43
	T2	2.941,21	2.902,93	2.950,95	3.006,63	64,12	61,92	66,62	68,87
	PFO	3.225,66	3.186,75	3.232,97	3.281,52	96,41	87,90	95,73	95,19
	PR	3.821,63	3.828,67	3.798,06	3.780,68	95,37	99,04	105,85	100,28
NPr	T1	2.771,59	2.753,48	2.768,08	2.796,34	53,99	49,76	54,02	53,65
	T2s	2.733,25	2.699,34	2.738,28	2.769,71	53,12	52,06	50,44	53,85
	T2	2.740,34	2.707,68	2.742,44	2.776,58	54,82	49,62	50,36	56,75
	PFO	2.832,83	2.828,11	2.844,60	2.857,10	51,50	50,50	51,91	53,67
	PR	3.211,94	3.220,55	3.189,91	3.219,87	68,99	67,87	64,80	62,76
SR	T1	2.716,12	2.711,57	2.729,73	2.746,87	49,93	45,74	49,25	49,05
	T2s	2.668,87	2.649,25	2.688,01	2.738,54	48,19	46,07	51,93	54,31
	T2	2.676,15	2.650,32	2.688,23	2.734,55	46,12	46,90	49,13	55,78
	PFO	2.797,43	2.806,58	2.812,48	2.830,31	51,19	51,50	48,83	51,55
	PR	3.211,16	3.214,95	3.199,92	3.220,02	67,57	66,66	67,57	64,63

TABLA 8.10: Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (I) - 25 Tareas

Repoblación	Selección	Media de los costes mínimos				Media de los costes máximos			
		PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8	PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8
NI	T1	1.003,05	1.003,47	<b>990,78</b>	1.005,32	1.117,39	1.107,53	1.108,39	1.115,55
	T2s	1.000,94	997,97	997,79	997,96	1.110,72	1.100,17	1.103,21	1.096,30
	T2	999,50	994,14	995,62	991,98	1.107,12	1.101,25	1.103,04	<b>1.089,03</b>
	PFO	1.017,17	1.017,26	1.023,75	1.020,83	1.131,74	1.132,19	1.122,03	1.141,92
	PR	1.152,20	1.142,48	1.138,41	1.157,62	1.291,10	1.271,62	1.275,41	1.290,44
NPm	T1	1.088,24	1.078,66	1.077,47	1.075,35	1.228,44	1.225,17	1.243,23	1.242,84
	T2s	1.039,46	1.030,21	1.041,08	1.040,06	1.171,23	1.165,56	1.180,62	1.182,11
	T2	1.045,37	1.031,22	1.045,61	1.034,83	1.181,23	1.173,11	1.184,68	1.179,71
	PFO	1.084,61	1.085,52	1.084,10	1.087,82	1.256,47	1.241,71	1.263,05	1.252,84
	PR	1.214,76	1.209,99	1.209,92	1.194,62	1.399,79	1.423,62	1.402,49	1.387,38
NP <sub>r</sub>	T1	1.031,07	1.014,47	1.017,79	1.027,92	1.144,50	1.138,89	1.153,02	1.139,83
	T2s	1.018,26	1.016,37	1.022,39	1.010,08	1.152,54	1.137,68	1.130,67	1.142,93
	T2	1.019,90	1.019,67	1.016,93	1.019,07	1.148,12	1.125,31	1.139,67	1.138,73
	PFO	1.035,04	1.024,81	1.034,97	1.039,52	1.161,61	1.150,74	1.155,81	1.153,05
	PR	1.125,75	1.126,90	1.118,13	1.120,18	1.265,58	1.257,83	1.252,36	1.275,26
SR	T1	997,94	1.005,13	1.009,92	1.014,80	1.124,46	1.116,49	1.123,49	1.128,83
	T2s	1.006,02	1.000,72	1.009,86	1.014,80	1.121,81	1.112,43	1.128,07	1.136,44
	T2	1.010,87	1.001,30	1.007,25	1.011,04	1.126,81	1.110,65	1.136,26	1.135,66
	PFO	1.010,67	1.015,45	1.014,59	1.016,57	1.125,33	1.130,81	1.128,57	1.125,49
	PR	1.119,49	1.118,88	1.117,79	1.142,93	1.259,66	1.256,04	1.261,36	1.275,94

TABLA 8.11: Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (II) - 25 Tareas

Repoblación	Selección	Media de los costes medios				Media de las desviaciones			
		PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8	PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8
NI	T1	1.054,74	1.051,36	1.051,99	1.053,83	21,96	21,47	23,50	22,38
	T2s	1.048,93	1.040,27	1.049,30	1.042,16	21,54	<b>21,04</b>	22,26	21,85
	T2	1.050,90	1.047,57	1.048,05	<b>1.040,18</b>	21,89	21,43	22,06	21,39
	PFO	1.074,01	1.072,06	1.074,53	1.079,05	23,85	23,35	21,23	22,80
	PR	1.222,29	1.210,95	1.209,71	1.226,22	28,13	24,18	29,83	28,70
NPm	T1	1.151,58	1.147,07	1.155,44	1.159,86	29,73	29,41	32,04	31,53
	T2s	1.098,89	1.093,92	1.107,32	1.106,63	26,05	27,31	28,13	26,48
	T2	1.108,67	1.099,76	1.111,09	1.111,15	26,37	27,26	28,88	28,05
	PFO	1.165,85	1.156,62	1.167,36	1.171,92	33,89	32,19	36,22	32,54
	PR	1.308,93	1.316,89	1.305,21	1.301,50	40,00	39,86	37,66	37,42
NP <sub>r</sub>	T1	1.084,89	1.076,39	1.082,42	1.083,75	25,14	26,99	26,07	24,02
	T2s	1.078,38	1.070,39	1.077,13	1.073,84	25,42	25,75	22,46	26,29
	T2	1.077,76	1.070,01	1.079,11	1.074,94	26,10	23,25	23,93	24,80
	PFO	1.093,01	1.085,61	1.089,94	1.092,91	24,05	26,01	23,22	23,75
	PR	1.193,85	1.193,04	1.193,54	1.202,95	25,30	26,56	25,10	29,85
SR	T1	1.059,17	1.054,16	1.063,73	1.064,10	24,31	22,29	24,68	21,91
	T2s	1.058,36	1.052,58	1.064,00	1.066,80	24,03	22,19	23,10	25,41
	T2	1.062,45	1.049,95	1.062,19	1.067,08	22,89	23,47	25,26	23,99
	PFO	1.068,00	1.067,89	1.071,72	1.072,59	23,37	24,50	22,84	22,71
	PR	1.190,41	1.192,44	1.192,09	1.203,92	28,83	27,73	28,48	27,06

TABLA 8.12: Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (I) - 50 Tareas

Repoblación	Selección	Media de los costes mínimos				Media de los costes máximos			
		PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8	PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8
NI	T1	2.216,33	2.201,52	2.207,09	2.220,34	2.434,90	2.442,45	2.438,14	2.447,16
	T2s	2.156,49	2.155,28	2.153,41	<b>2.149,62</b>	2.375,77	2.380,56	2.393,39	2.392,15
	T2	2.163,54	2.169,34	2.164,61	2.150,52	2.387,98	<b>2.370,73</b>	2.412,73	2.405,20
	PFO	2.278,14	2.285,75	2.289,17	2.317,68	2.525,28	2.533,31	2.531,09	2.568,65
	PR	2.634,05	2.638,71	2.605,91	2.629,58	2.941,48	2.929,78	2.907,45	2.948,35
NPm	T1	2.471,20	2.462,92	2.503,96	2.532,49	2.834,71	2.824,58	2.848,43	2.873,09
	T2s	2.332,72	2.316,38	2.351,95	2.374,48	2.627,09	2.603,01	2.661,23	2.684,22
	T2	2.347,05	2.339,21	2.366,76	2.389,87	2.645,61	2.623,69	2.651,51	2.682,89
	PFO	2.515,53	2.512,45	2.507,16	2.571,15	2.862,14	2.853,06	2.920,96	2.945,06
	PR	2.956,44	2.921,45	2.899,36	2.924,01	3.434,52	3.406,32	3.383,76	3.362,51
NPr	T1	2.247,36	2.217,56	2.226,44	2.273,24	2.518,31	2.495,13	2.505,21	2.538,38
	T2s	2.222,38	2.206,32	2.240,93	2.259,97	2.478,76	2.439,46	2.478,05	2.510,53
	T2	2.226,92	2.195,38	2.243,30	2.268,79	2.472,33	2.473,16	2.485,98	2.532,33
	PFO	2.297,28	2.290,88	2.293,70	2.305,23	2.545,47	2.542,65	2.568,07	2.595,57
	PR	2.577,21	2.571,54	2.572,17	2.596,80	2.876,98	2.873,47	2.850,56	2.874,26
SR	T1	2.201,91	2.196,63	2.205,54	2.206,56	2.435,73	2.436,29	2.453,13	2.468,72
	T2s	2.191,74	2.164,19	2.182,67	2.199,35	2.410,81	2.397,59	2.457,48	2.469,58
	T2	2.190,86	2.158,44	2.176,45	2.209,57	2.421,53	2.389,71	2.430,13	2.491,11
	PFO	2.235,45	2.255,09	2.269,35	2.274,23	2.490,41	2.521,64	2.508,98	2.544,94
	PR	2.567,40	2.585,42	2.573,40	2.588,16	2.893,54	2.871,85	2.875,52	2.891,35

TABLA 8.13: Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (II)- 50 Tareas

Repoblación	Selección	Media de los costes medios				Media de las desviaciones			
		PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8	PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8
NI	T1	2.322,63	2.314,73	2.321,92	2.333,56	43,84	46,44	46,35	47,04
	T2s	2.270,08	<b>2.267,59</b>	2.273,67	2.276,59	47,22	45,73	48,79	47,60
	T2	2.274,75	2.268,19	2.290,36	2.284,10	45,20	<b>41,83</b>	49,11	45,65
	PFO	2.406,14	2.416,75	2.417,81	2.436,25	46,17	48,65	46,95	49,76
	PR	2.796,26	2.771,48	2.756,26	2.807,92	60,54	58,12	53,94	61,90
NPm	T1	2.649,55	2.639,27	2.667,94	2.698,83	70,08	72,67	66,12	71,80
	T2s	2.477,81	2.453,44	2.505,59	2.532,43	58,42	58,38	59,85	65,03
	T2	2.497,25	2.476,57	2.514,00	2.540,24	60,31	55,66	57,14	58,81
	PFO	2.691,84	2.681,62	2.717,05	2.746,94	76,91	71,03	77,95	78,19
	PR	3.181,96	3.181,20	3.161,50	3.144,79	94,19	96,72	94,80	88,40
NPr	T1	2.381,34	2.355,41	2.368,02	2.396,97	53,64	51,47	52,14	54,98
	T2s	2.354,89	2.324,33	2.358,59	2.379,43	55,19	48,50	51,34	50,04
	T2	2.359,70	2.333,87	2.360,29	2.383,16	48,93	52,34	49,55	54,61
	PFO	2.418,88	2.407,18	2.426,09	2.432,74	50,91	49,29	50,47	54,12
	PR	2.718,38	2.724,51	2.720,18	2.747,40	60,13	58,39	52,84	54,69
SR	T1	2.319,98	2.314,75	2.331,02	2.340,74	49,74	48,62	47,63	49,32
	T2s	2.297,64	2.275,27	2.310,42	2.345,87	44,89	44,32	55,87	52,38
	T2	2.304,26	2.279,08	2.313,13	2.344,35	44,22	44,41	48,42	55,92
	PFO	2.372,56	2.380,93	2.392,53	2.406,00	51,69	48,36	48,58	51,78
	PR	2.721,19	2.729,19	2.721,33	2.742,82	61,42	54,56	57,29	57,89

TABLA 8.14: Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (I) - 100 Tareas

Repoblación	Selección	Media de los costes mínimos				Media de los costes máximos			
		PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8	PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8
NI	T1	4.613,39	4.631,85	4.635,39	4.646,16	5.001,05	5.014,45	4.974,28	5.031,37
	T2s	4.457,43	<b>4.435,62</b>	4.474,79	4.520,14	4.816,47	<b>4.778,86</b>	4.827,83	4.864,20
	T2	4.474,84	4.463,75	4.467,01	4.525,73	4.817,58	4.815,98	4.826,97	4.889,74
	PFO	4.821,70	4.831,95	4.818,21	4.864,35	5.200,37	5.224,41	5.224,34	5.280,91
	PR	5.566,85	5.502,40	5.444,14	5.565,43	6.224,20	6.160,87	6.051,60	6.206,24
NPm	T1	5.243,35	5.210,57	5.277,60	5.430,00	6.050,39	5.952,59	5.985,07	6.187,66
	T2s	4.850,94	4.821,38	4.891,52	5.056,93	5.479,50	5.339,38	5.489,78	5.577,22
	T2	4.943,99	4.838,57	4.956,75	5.060,82	5.528,13	5.401,78	5.519,32	5.661,99
	PFO	5.369,99	5.335,25	5.444,78	5.485,51	6.274,08	6.147,55	6.271,87	6.369,78
	PR	6.539,52	6.543,42	6.433,26	6.423,23	7.281,78	7.350,09	7.324,40	7.291,30
NP <sub>r</sub>	T1	4.630,94	4.635,87	4.640,47	4.692,12	5.063,47	5.003,72	5.071,64	5.146,64
	T2s	4.555,66	4.499,55	4.548,58	4.638,14	4.990,74	4.899,36	4.977,02	5.066,69
	T2	4.556,73	4.547,84	4.603,37	4.655,48	5.001,60	4.908,81	5.000,40	5.092,06
	PFO	4.784,47	4.806,75	4.807,81	4.834,17	5.190,18	5.204,97	5.220,46	5.268,60
	PR	5.424,81	5.445,37	5.360,15	5.464,00	6.057,49	6.043,83	5.914,21	5.982,68
SR	T1	4.578,62	4.588,55	4.592,92	4.647,24	4.959,56	4.960,47	4.979,21	5.035,29
	T2s	4.473,16	4.453,49	4.481,13	4.585,59	4.843,36	4.794,74	4.879,69	5.020,11
	T2	4.485,41	4.441,64	4.505,89	4.569,22	4.840,31	4.804,09	4.873,46	5.031,35
	PFO	4.735,96	4.780,86	4.781,39	4.798,90	5.162,29	5.167,04	5.162,38	5.233,38
	PR	5.451,09	5.407,03	5.379,67	5.415,24	6.012,07	5.995,09	5.972,04	5.988,33

TABLA 8.15: Determinación de los mecanismos de repoblación y selección (II) - 100 Tareas

Repoblación	Selección	Media de los costes medios				Media de las desviaciones			
		PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8	PMX-ISM 0.6-0.4	PMX-ISM 0.5-0.5	OX1-ISM 0.65-0.35	OX1-EM 0.2-0.8
NI	T1	4.794,29	4.814,72	4.810,79	4.836,97	73,56	75,92	72,80	77,00
	T2s	4.641,09	<b>4.621,56</b>	4.654,84	4.687,02	77,40	68,50	71,83	77,09
	T2	4.651,93	4.635,50	4.661,96	4.705,34	71,80	73,33	77,00	71,06
	PFO	5.012,06	5.017,17	5.030,97	5.065,49	74,80	78,70	82,31	86,77
	PR	5.895,12	5.845,45	5.771,91	5.878,64	124,13	122,55	120,01	128,16
NPm	T1	5.638,69	5.555,18	5.632,48	5.764,36	158,10	149,43	146,09	155,64
	T2s	5.148,14	5.074,99	5.182,99	5.316,45	110,43	101,20	112,03	110,79
	T2	5.217,71	5.132,47	5.227,75	5.368,50	105,68	102,85	113,85	119,76
	PFO	5.819,28	5.722,01	5.814,49	5.925,70	178,42	160,49	173,03	174,86
	PR	6.974,01	6.987,91	6.927,48	6.895,74	151,91	160,53	185,10	175,00
NP <sub>r</sub>	T1	4.848,53	4.828,63	4.853,80	4.908,29	83,19	70,82	83,84	81,97
	T2s	4.766,47	4.703,30	4.779,12	4.855,86	78,74	81,92	77,52	85,23
	T2	4.783,55	4.719,15	4.787,93	4.871,64	89,43	73,25	77,60	90,84
	PFO	4.986,59	4.991,54	5.017,78	5.045,65	79,55	76,20	82,03	83,14
	PR	5.723,60	5.744,10	5.656,01	5.709,27	121,52	118,65	116,48	103,73
SR	T1	4.769,21	4.765,80	4.794,43	4.835,77	75,76	<b>66,32</b>	75,43	75,92
	T2s	4.650,60	4.679,90	4.689,62	4.802,96	75,65	71,71	76,81	85,15
	T2	4.661,74	4.681,93	4.689,37	4.792,21	71,24	72,81	73,72	87,44
	PFO	4.951,74	4.970,92	4.973,20	5.012,32	78,50	81,63	75,06	80,15
	PR	5.721,87	5.723,21	5.686,34	5.713,32	112,46	117,70	116,92	108,93

Atendiendo a las simulaciones realizadas del GA se puede observar que los mecanismos de repoblación que mejores prestaciones alcanzan son NI y SR cuando estos están en combinación con los métodos de selección por torneo. Dependiendo del tamaño del problema, unas combinaciones de operadores de cruce y mutación presentan mejores prestaciones que otras; por ejemplo, para instancias de 25 tareas de tamaño, la combinación OX1-EM obtiene el mejor rendimiento (Ver Tablas 8.10 y 8.11). A pesar de eso, las especificaciones y los parámetros que dan mejores resultados generales con el mismo son:

- Operador de cruce PMX con  $P_{cross} = 0,5$ .
- Operador de mutación ISM con  $P_{cross} = 0,5$
- Selección de dos torneos sin coincidencia.
- Repoblación que genera un nuevo individuo aleatorio cuando alguno coincide.

Estas especificaciones del algoritmo genético además de ser las que mejor se adaptan en general al problema bajo estudio tienen un buen rendimiento en todos los casos, con muy poca discrepancia sobre las especificaciones mejor adaptadas.

### 8.3. Resultados de interés para la tesis

El presente capítulo ha mostrado una serie de mecanismos para la mejora de las soluciones encontradas con las heurísticas del Capítulo 7. Dos propuestas se han realizado: unos operadores de búsqueda local y un procedimiento metaheurístico como los algoritmos genéticos; los cuales han sido parametrizados, buscando de todas las variantes posibles la que mejor se adapta al problema bajo estudio.

Además, en el caso de los GAs se ha presentado una propuesta para que los mismos sirvan para adaptar en cada reoptimización las soluciones previamente alcanzadas al problema (Ver Figura 8.4).



## Resultados

En los Capítulos 7 y 8 se explicaron todas las metodologías que han sido estudiadas para formar parte del módulo de optimización de sistema de mejora del acarreo terrestre. Este capítulo testeará los mismos a través de una batería de problemas generada para tal fin. Dicha batería está compuesta por 29 instancias que están divididas en tres clases de problemas (distribución aleatoria de las tareas R1; distribución clusterizada, C1; y distribución mixta, RC1); las características de dicha batería pueden verse con mayor detalle en el Apéndice A.

Primero se compararán las diferentes heurísticas planteadas en un entorno determinista y estático; seguidamente se estudiará el empeoramiento de las soluciones propuestas anteriormente cuando las condiciones son más realistas, es decir, cuando se está en un entorno estocástico. De la información suministrada por ambos estudios, se deducirán cuáles de las heurísticas planteadas son las más idóneas para adaptarlas a una metodología de resolución dinámica; sobre dichas heurísticas se realizarán una serie de experimentos que darán luz sobre los mejores parámetros de reoptimización. Por último, se estudia sobre la heurística propuesta como influyen los mecanismos de mejora estudiados en los Capítulos 7 y 8.

### 9.1. Comparativa de las heurísticas en entornos deterministas y sin reoptimización

Esta sección realizará una comparativa de las heurísticas en las diferentes clases de problemas generados y para tres tamaños diferentes de tareas a realizar durante la jornada. Las Tablas 9.1, 9.2 y 9.3, muestran los resultados para la clase R1; las Tablas 9.4, 9.5 y 9.6 para la clase C1; y las Tablas 9.7, 9.8 y 9.9 para la clase RC1. La Tabla 9.10 hace un resumen de todas las anteriores, mostrando el coste medio por tarea.

TABLA 9.1: Comparativa de heurísticas en entornos deterministas y estáticos  
Clase R1 y 25 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
1	SCH	984,40	9	12,00	2	0,00	0	1086,40	0,23
	NNH	998,86	10	17,31	5	0,00	0	1116,17	0,09
	IH	1055,04	10	18,49	3	0,00	0	1173,53	0,85
	I2PH	984,40	10	0,00	0	0,00	0	<b>1084,40</b>	0,25
	I <sup>2</sup> 2PH	984,40	10	0,00	0	0,00	0	<b>1084,40</b>	0,33
2	SCH	998,82	7	8,16	1	0,00	0	1076,98	0,24
	NNH	1058,91	8	1,70	1	0,00	0	1140,61	0,04
	IH	1057,63	9	2,77	2	0,00	0	1150,40	0,85
	I2PH	961,44	7	0,00	0	0,00	0	<b>1031,44</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	961,44	7	0,00	0	0,00	0	<b>1031,44</b>	0,08
3	SCH	848,03	7	0,00	0	0,00	0	918,03	0,23
	NNH	935,97	6	0,00	0	0,00	0	995,97	0,04
	IH	947,91	6	6,31	1	0,00	0	1014,22	0,67
	I2PH	821,66	7	0,00	0	0,00	0	<b>891,66</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	821,66	7	0,00	0	0,00	0	<b>891,66</b>	0,06
4	SCH	853,85	6	0,00	0	0,00	0	913,85	0,24
	NNH	922,19	6	0,00	0	0,00	0	982,19	0,04
	IH	983,86	6	0,00	0	0,00	0	1043,86	0,67
	I2PH	810,31	5	0,00	0	0,00	0	<b>860,31</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	810,31	5	0,00	0	0,00	0	<b>860,31</b>	0,06
5	SCH	986,21	9	0,00	0	0,00	0	1076,21	0,23
	NNH	1051,54	9	6,97	2	0,00	0	1148,50	0,04
	IH	1090,41	8	14,31	1	0,00	0	1184,72	0,70
	I2PH	974,28	8	0,00	0	0,00	0	<b>1054,28</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	974,28	8	0,00	0	0,00	0	<b>1054,28</b>	0,06
6	SCH	950,12	7	0,00	0	0,00	0	1020,12	0,24
	NNH	1060,60	7	2,17	1	0,00	0	1132,77	0,04
	IH	993,92	6	4,50	1	0,00	0	1058,42	0,68
	I2PH	940,58	7	0,00	0	0,00	0	<b>1010,58</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	940,58	7	0,00	0	0,00	0	<b>1010,58</b>	0,06
7	SCH	952,27	7	0,00	0	0,00	0	1022,27	0,24
	NNH	993,84	6	5,41	1	0,00	0	1059,26	0,04
	IH	1021,50	5	6,43	1	0,00	0	1077,93	0,67
	I2PH	925,33	7	0,00	0	0,00	0	<b>995,33</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	925,33	7	0,00	0	0,00	0	<b>995,33</b>	0,06
8	SCH	936,01	6	0,00	0	0,00	0	996,01	0,24
	NNH	1020,74	5	4,83	1	0,00	0	1075,57	0,04
	IH	948,02	5	2,17	1	0,00	0	1000,19	0,68
	I2PH	898,25	6	0,00	0	0,00	0	<b>958,25</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	898,25	6	0,00	0	0,00	0	<b>958,25</b>	0,06
9	SCH	885,21	7	7,17	1	0,00	0	962,38	0,23
	NNH	1075,75	7	1,55	2	0,00	0	1147,29	0,04
	IH	1089,70	6	7,81	2	0,00	0	1157,50	0,68
	I2PH	885,21	6	0,00	0	0,00	0	<b>945,21</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	885,21	6	0,00	0	0,00	0	<b>945,21</b>	0,06
10	SCH	837,67	8	0,00	0	0,00	0	917,67	0,23
	NNH	976,67	7	9,34	2	0,00	0	1056,01	0,04
	IH	1007,36	6	7,88	1	0,00	0	1075,24	0,68
	I2PH	837,67	7	0,00	0	0,00	0	<b>907,67</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	837,67	7	0,00	0	0,00	0	<b>907,67</b>	0,06
11	SCH	894,80	7	0,00	0	0,00	0	964,80	0,24
	NNH	991,66	6	2,96	1	0,00	0	1054,63	0,04
	IH	1084,98	6	1,44	1	0,00	0	1146,42	0,68
	I2PH	892,54	7	0,00	0	0,00	0	<b>962,54</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	892,54	7	0,00	0	0,00	0	<b>962,54</b>	0,06
12	SCH	891,15	7	0,00	0	0,00	0	961,15	0,25
	NNH	986,91	6	4,22	2	0,00	0	1051,14	0,04
	IH	962,01	6	3,51	1	0,00	0	1025,52	0,68
	I2PH	891,15	6	0,00	0	0,00	0	<b>951,15</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	891,15	6	0,00	0	0,00	0	<b>951,15</b>	0,06

TABLA 9.2: Comparativa de heurísticas en entornos deterministas y estáticos  
Clase R1 y 50 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
1	SCH	1905,13	20	4,17	1	0,00	0	2109,29	1,62
	NNH	2024,88	21	39,07	9	0,00	0	2273,95	0,08
	IH	2158,12	18	80,54	9	0,00	0	2418,66	5,16
	I2PH	1905,13	20	0,00	0	0,00	0	<b>2105,13</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1905,13	20	0,00	0	0,00	0	<b>2105,13</b>	0,17
2	SCH	1855,63	14	0,20	1	0,00	0	1995,82	1,68
	NNH	2058,60	15	10,85	7	0,00	0	2219,44	0,08
	IH	2158,12	18	80,54	9	0,00	0	2418,66	5,16
	I2PH	1832,18	14	0,00	0	0,00	0	<b>1972,18</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1832,18	14	0,00	0	0,00	0	<b>1972,18</b>	0,15
3	SCH	1724,03	13	2,83	1	0,00	0	1856,86	1,69
	NNH	1958,29	11	15,97	6	0,00	0	2084,26	0,08
	IH	1837,06	11	66,19	9	0,00	0	2013,25	4,74
	I2PH	1682,02	14	0,00	0	0,00	0	<b>1822,02</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1682,02	14	0,00	0	0,00	0	<b>1822,02</b>	0,14
4	SCH	1701,87	10	0,00	0	0,00	0	1801,87	1,71
	NNH	1828,01	10	0,00	0	0,00	0	1928,01	0,08
	IH	1882,42	11	4,36	1	0,00	0	1996,78	4,74
	I2PH	1646,42	9	0,00	0	0,00	0	<b>1736,42</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1646,42	9	0,00	0	0,00	0	<b>1736,42</b>	0,14
5	SCH	1888,44	16	0,00	0	0,00	0	<b>2048,44</b>	1,67
	NNH	2086,94	14	26,10	7	0,00	0	2253,04	0,08
	IH	2122,28	13	47,70	6	0,00	0	2299,99	4,92
	I2PH	1889,10	17	0,00	0	0,00	0	2059,10	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1889,10	17	0,00	0	0,00	0	2059,10	0,15
6	SCH	1759,77	13	0,00	0	0,00	0	<b>1889,77</b>	1,69
	NNH	2044,22	12	26,44	8	0,00	0	2190,66	0,08
	IH	2069,55	12	45,26	7	0,00	0	2234,80	4,81
	I2PH	1752,30	14	0,00	0	0,00	0	1892,30	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1752,30	14	0,00	0	0,00	0	1892,30	0,14
7	SCH	1726,44	11	0,00	0	0,00	0	<b>1836,44</b>	1,70
	NNH	2014,69	10	5,21	2	0,00	0	2119,90	0,08
	IH	1969,18	11	0,00	0	0,00	0	2079,18	4,77
	I2PH	1732,53	12	0,00	0	0,00	0	1852,53	0,05
	I <sup>2</sup> 2PH	1732,53	12	0,00	0	0,00	0	1852,53	0,14
8	SCH	1672,95	9	0,00	0	0,00	0	1762,95	1,71
	NNH	1861,68	9	0,00	0	0,00	0	1951,68	0,08
	IH	1853,30	9	4,97	1	0,00	0	1948,28	4,73
	I2PH	1641,36	10	0,00	0	0,00	0	<b>1741,36</b>	0,05
	I <sup>2</sup> 2PH	1641,36	10	0,00	0	0,00	0	<b>1741,36</b>	0,15
9	SCH	1734,84	14	0,00	0	0,00	0	<b>1874,84</b>	1,69
	NNH	2071,42	12	19,33	8	0,00	0	2210,75	0,08
	IH	2145,27	12	16,05	4	0,00	0	2281,32	4,84
	I2PH	1730,93	15	0,00	0	0,00	0	1880,93	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1730,93	15	0,00	0	0,00	0	1880,93	0,15
10	SCH	1715,73	13	0,00	0	0,00	0	1845,73	1,70
	NNH	2109,75	13	1,22	3	0,00	0	2240,97	0,08
	IH	2025,39	11	9,67	4	0,00	0	2145,06	4,81
	I2PH	1713,99	12	0,00	0	0,00	0	<b>1833,99</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1713,99	12	0,00	0	0,00	0	<b>1833,99</b>	0,15
11	SCH	1768,67	14	0,00	0	0,00	0	1908,67	1,69
	NNH	2119,81	12	11,39	3	0,00	0	2251,20	0,08
	IH	2111,29	11	6,62	2	0,00	0	2227,90	4,80
	I2PH	1731,21	14	0,00	0	0,00	0	<b>1871,21</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1731,21	14	0,00	0	0,00	0	<b>1871,21</b>	0,14
12	SCH	1643,63	14	0,00	0	0,00	0	1783,63	1,68
	NNH	1931,29	12	0,76	2	0,00	0	2052,04	0,09
	IH	1904,07	10	18,77	4	0,00	0	2022,85	4,80
	I2PH	1643,63	12	0,00	0	0,00	0	<b>1763,63</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1643,63	12	0,00	0	0,00	0	<b>1763,63</b>	0,15

TABLA 9.3: Comparativa de heurísticas en entornos deterministas y estáticos  
Clase R1 y 100 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
1	SCH	3578,95	36	30,80	5	0,00	0	3969,75	12,76
	NNH	3800,30	37	46,32	18	0,00	0	4216,62	0,27
	IH	4111,29	30	178,28	28	0,00	0	4589,57	37,47
	I2PH	3584,44	40	0,00	0	0,00	0	3984,44	0,16
	I <sup>2</sup> 2PH	3565,49	40	0,00	0	0,00	0	<b>3965,49</b>	0,48
2	SCH	3371,00	26	6,67	2	0,00	0	3637,67	13,28
	NNH	3863,10	28	23,53	12	0,00	0	4166,63	0,26
	IH	4111,29	30	178,28	28	0,00	0	4589,57	37,47
	I2PH	3330,61	25	0,00	0	0,00	0	<b>3580,61</b>	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	3330,61	25	0,00	0	0,00	0	<b>3580,61</b>	0,47
3	SCH	3146,50	21	0,00	0	0,00	0	3356,50	13,33
	NNH	3548,52	21	10,09	7	0,00	0	3768,61	0,27
	IH	3546,52	20	66,81	13	0,00	0	3813,33	36,14
	I2PH	3045,01	21	0,00	0	0,00	0	<b>3255,01</b>	0,12
	I <sup>2</sup> 2PH	3045,01	21	0,00	0	0,00	0	<b>3255,01</b>	0,50
4	SCH	3066,58	18	0,00	0	0,00	0	3246,58	13,34
	NNH	3346,82	17	7,01	3	0,00	0	3523,83	0,28
	IH	3325,75	18	0,94	1	0,00	0	3506,68	35,82
	I2PH	2923,68	18	0,00	0	0,00	0	<b>3103,68</b>	0,14
	I <sup>2</sup> 2PH	2923,68	18	0,00	0	0,00	0	<b>3103,68</b>	0,50
5	SCH	3310,08	28	7,59	2	0,00	0	3597,67	13,12
	NNH	3812,44	25	26,04	18	0,00	0	4088,48	0,26
	IH	3879,07	24	75,79	15	0,00	0	4194,85	36,34
	I2PH	3310,77	28	0,00	0	0,00	0	<b>3590,77</b>	0,15
	I <sup>2</sup> 2PH	3310,77	28	0,00	0	0,00	0	<b>3590,77</b>	0,48
6	SCH	3240,81	23	0,00	0	0,00	0	3470,81	13,23
	NNH	3735,25	24	12,53	11	0,00	0	3987,78	0,27
	IH	3996,43	23	19,18	9	0,00	0	4245,61	35,90
	I2PH	3206,42	22	0,00	0	0,00	0	<b>3426,42</b>	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	3206,42	22	0,00	0	0,00	0	<b>3426,42</b>	0,48
7	SCH	3108,52	20	0,00	0	0,00	0	3308,52	13,33
	NNH	3457,97	18	9,72	6	0,00	0	3647,69	0,26
	IH	3513,02	18	39,21	8	0,00	0	3732,23	35,69
	I2PH	3013,28	19	0,00	0	0,00	0	<b>3203,28</b>	0,12
	I <sup>2</sup> 2PH	3013,28	19	0,00	0	0,00	0	<b>3203,28</b>	0,50
8	SCH	2966,61	18	0,00	0	0,00	0	3146,61	13,29
	NNH	3444,17	17	4,92	3	0,00	0	3619,09	0,26
	IH	3198,79	17	15,71	2	0,00	0	3384,51	35,54
	I2PH	2924,06	20	0,00	0	0,00	0	<b>3124,06</b>	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	2924,06	20	0,00	0	0,00	0	<b>3124,06</b>	0,50
9	SCH	3117,19	24	0,00	0	0,00	0	3357,19	13,20
	NNH	3700,28	26	22,40	15	0,00	0	3982,68	0,27
	IH	3729,09	22	42,65	10	0,00	0	3991,74	36,39
	I2PH	3112,27	23	0,00	0	0,00	0	<b>3342,27</b>	0,14
	I <sup>2</sup> 2PH	3112,27	23	0,00	0	0,00	0	<b>3342,27</b>	0,49
10	SCH	3021,11	25	0,00	0	0,00	0	3271,11	13,22
	NNH	3728,30	22	6,15	11	0,00	0	3954,45	0,27
	IH	3675,37	21	23,68	8	0,00	0	3909,05	36,24
	I2PH	2976,53	22	0,00	0	0,00	0	<b>3196,53</b>	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	2976,53	22	0,00	0	0,00	0	<b>3196,53</b>	0,49
11	SCH	3166,60	24	0,77	1	0,00	0	3407,37	13,26
	NNH	3619,66	21	17,84	8	0,00	0	3847,49	0,29
	IH	3817,45	21	20,30	3	0,00	0	4047,75	36,06
	I2PH	3154,99	23	0,00	0	0,00	0	<b>3384,99</b>	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	3154,99	23	0,00	0	0,00	0	<b>3384,99</b>	0,50
12	SCH	2918,70	24	0,00	0	0,00	0	3158,70	13,23
	NNH	3683,10	20	0,55	3	0,00	0	3883,66	0,27
	IH	3637,56	20	13,47	5	0,00	0	3851,03	37,61
	I2PH	2918,70	23	0,00	0	0,00	0	<b>3148,70</b>	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	2918,70	23	0,00	0	0,00	0	<b>3148,70</b>	0,53

TABLA 9.4: Comparativa de heurísticas en entornos deterministas y estáticos  
Clase C1 y 25 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
1	SCH	807,66	4	2,33	1	0,00	0	849,99	0,28
	NNH	772,51	4	15,00	4	0,00	0	827,52	0,07
	IH	734,54	4	34,83	3	0,00	0	<b>809,37</b>	0,65
	I2PH	807,13	3	0,00	0	0,00	0	837,13	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	807,13	3	0,00	0	0,00	0	837,13	0,25
2	SCH	721,12	5	0,00	0	0,00	0	771,12	0,24
	NNH	767,68	2	0,00	0	0,00	0	787,68	0,04
	IH	734,39	4	15,00	2	0,00	0	789,39	0,66
	I2PH	668,13	4	0,00	0	0,00	0	<b>708,13</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	668,13	4	0,00	0	0,00	0	<b>708,13</b>	0,06
3	SCH	740,96	2	5,85	1	0,00	0	766,81	0,24
	NNH	898,47	2	24,19	3	0,00	0	942,66	0,04
	IH	741,64	3	16,85	3	0,00	0	788,49	0,65
	I2PH	643,46	3	0,00	0	0,00	0	<b>673,46</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	643,46	3	0,00	0	0,00	0	<b>673,46</b>	0,05
4	SCH	778,19	5	0,00	0	0,00	0	828,19	0,24
	NNH	773,64	2	4,98	1	0,00	0	798,61	0,03
	IH	668,99	2	0,63	1	0,00	0	689,62	0,65
	I2PH	655,82	2	0,00	0	0,00	0	<b>675,82</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	655,82	2	0,00	0	0,00	0	<b>675,82</b>	0,05
5	SCH	770,21	3	0,00	0	0,00	0	800,21	0,24
	NNH	712,11	3	4,05	2	0,00	0	<b>746,16</b>	0,04
	IH	784,12	3	13,22	1	0,00	0	827,33	0,65
	I2PH	737,16	3	0,00	0	0,00	0	767,16	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	737,16	3	0,00	0	0,00	0	767,16	0,06
6	SCH	879,44	6	0,00	0	0,00	0	939,44	0,25
	NNH	780,07	4	7,03	3	0,00	0	827,10	0,04
	IH	720,36	4	9,48	3	0,00	0	<b>769,84</b>	0,65
	I2PH	809,91	3	0,00	0	0,00	0	839,91	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	809,91	3	0,00	0	0,00	0	839,91	0,06
7	SCH	795,10	4	0,00	0	0,00	0	835,10	0,24
	NNH	772,13	2	2,48	1	0,00	0	794,61	0,03
	IH	795,18	3	14,61	2	0,00	0	839,79	0,66
	I2PH	728,59	3	0,00	0	0,00	0	<b>758,59</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	728,59	3	0,00	0	0,00	0	<b>758,59</b>	0,07
8	SCH	652,91	3	0,00	0	0,00	0	682,91	0,24
	NNH	741,15	3	0,00	0	0,00	0	771,15	0,04
	IH	684,28	2	0,00	0	0,00	0	704,28	0,66
	I2PH	632,36	2	0,00	0	0,00	0	<b>652,36</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	632,36	2	0,00	0	0,00	0	<b>652,36</b>	0,05
9	SCH	769,24	2	0,00	0	0,00	0	789,24	0,24
	NNH	786,72	3	2,04	1	0,00	0	818,76	0,03
	IH	751,06	2	0,00	0	0,00	0	771,06	0,65
	I2PH	654,89	4	0,00	0	0,00	0	<b>694,89</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	654,89	4	0,00	0	0,00	0	<b>694,89</b>	0,06

TABLA 9.5: Comparativa de heurísticas en entornos deterministas y estáticos  
Clase C1 y 50 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
1	SCH	1617,20	9	1,00	1	0,00	0	1708,20	1,74
	NNH	1593,43	5	42,65	9	0,00	0	1686,08	0,08
	IH	1599,59	7	87,96	4	0,00	0	1757,55	4,83
	I2PH	1586,60	6	0,00	0	0,00	0	<b>1646,60</b>	0,15
	I <sup>2</sup> 2PH	1586,60	6	0,00	0	0,00	0	<b>1646,60</b>	0,06
2	SCH	1580,41	8	0,00	0	0,00	0	1660,41	1,74
	NNH	1607,42	5	29,90	7	0,00	0	1687,32	0,08
	IH	1669,24	5	50,86	5	0,00	0	1770,10	4,74
	I2PH	1451,34	5	0,00	0	0,00	0	<b>1501,34</b>	0,05
	I <sup>2</sup> 2PH	1451,34	5	0,00	0	0,00	0	<b>1501,34</b>	0,14
3	SCH	1612,23	8	0,00	0	0,00	0	1692,23	1,75
	NNH	1842,55	4	18,73	4	0,00	0	1901,28	0,08
	IH	1587,26	4	18,95	3	0,00	0	1646,20	4,83
	I2PH	1394,43	5	0,00	0	0,00	0	<b>1444,43</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1394,43	5	0,00	0	0,00	0	<b>1444,43</b>	0,14
4	SCH	1627,48	4	0,00	0	0,00	0	1667,48	1,74
	NNH	1672,65	7	17,48	3	0,00	0	1760,13	0,08
	IH	1489,67	4	25,79	1	0,00	0	1555,46	4,88
	I2PH	1433,97	4	0,00	0	0,00	0	<b>1473,97</b>	0,05
	I <sup>2</sup> 2PH	1433,97	4	0,00	0	0,00	0	<b>1473,97</b>	0,15
5	SCH	1631,14	6	0,00	0	0,00	0	1691,14	1,76
	NNH	1644,11	5	19,35	6	0,00	0	1713,47	0,08
	IH	1662,72	5	12,22	2	0,00	0	1724,94	4,71
	I2PH	1577,85	5	0,00	0	0,00	0	<b>1627,85</b>	0,15
	I <sup>2</sup> 2PH	1577,85	5	0,00	0	0,00	0	<b>1627,85</b>	0,05
6	SCH	1664,33	7	4,29	1	0,00	0	1738,62	1,79
	NNH	1769,85	6	36,19	11	0,00	0	1866,04	0,08
	IH	1767,30	6	46,98	4	0,00	0	1874,27	4,77
	I2PH	1576,91	7	0,00	0	0,00	0	<b>1646,91</b>	0,15
	I <sup>2</sup> 2PH	1576,91	7	0,00	0	0,00	0	<b>1646,91</b>	0,05
7	SCH	1593,86	5	0,00	0	0,00	0	1643,86	1,76
	NNH	1543,46	5	31,48	8	0,00	0	1624,94	0,08
	IH	1619,77	5	76,57	5	0,00	0	1746,33	4,78
	I2PH	1482,99	5	0,00	0	0,00	0	<b>1532,99</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1482,99	5	0,00	0	0,00	0	<b>1532,99</b>	0,15
8	SCH	1431,31	3	0,00	0	0,00	0	1461,31	1,75
	NNH	1519,64	3	0,00	0	0,00	0	1549,64	0,08
	IH	1414,52	3	11,71	2	0,00	0	1456,23	4,87
	I2PH	1368,02	3	0,00	0	0,00	0	<b>1398,02</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1368,02	3	0,00	0	0,00	0	<b>1398,02</b>	0,14
9	SCH	1605,38	5	0,00	0	0,00	0	1655,38	1,82
	NNH	1515,63	4	15,59	7	0,00	0	1571,21	0,08
	IH	1491,02	4	37,54	2	0,00	0	1568,56	4,80
	I2PH	1455,47	6	0,00	0	0,00	0	<b>1515,47</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	1455,47	6	0,00	0	0,00	0	<b>1515,47</b>	0,15

TABLA 9.6: Comparativa de heurísticas en entornos deterministas y estáticos  
Clase C1 y 100 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
1	SCH	3907,84	15	3,36	1	0,00	0	4061,21	14,04
	NNH	3996,84	11	75,77	23	0,00	0	4182,61	0,26
	IH	4053,94	13	135,97	10	0,00	0	4319,91	44,01
	I2PH	3772,87	12	0,00	0	0,00	0	<b>3892,87</b>	0,14
	I <sup>2</sup> 2PH	3772,87	12	0,00	0	0,00	0	<b>3892,87</b>	0,47
2	SCH	3879,57	14	0,00	0	0,00	0	4019,57	13,79
	NNH	4173,98	10	39,33	11	0,00	0	4313,31	0,26
	IH	3831,25	12	120,60	11	0,00	0	4071,85	37,83
	I2PH	3565,51	10	0,00	0	0,00	0	<b>3665,51</b>	0,14
	I <sup>2</sup> 2PH	3565,51	10	0,00	0	0,00	0	<b>3665,51</b>	0,49
3	SCH	3917,11	11	5,55	1	0,00	0	4032,66	13,87
	NNH	4204,48	8	49,56	12	0,00	0	4334,04	0,26
	IH	3685,77	9	30,98	3	0,00	0	3806,75	38,62
	I2PH	3313,70	9	0,00	0	0,00	0	<b>3403,70</b>	0,14
	I <sup>2</sup> 2PH	3313,70	9	0,00	0	0,00	0	<b>3403,70</b>	0,49
4	SCH	3758,20	10	0,00	0	0,00	0	3858,20	13,69
	NNH	4082,58	10	24,57	4	0,00	0	4207,15	0,26
	IH	3650,12	7	61,54	5	0,00	0	3781,66	43,73
	I2PH	3262,20	7	0,00	0	0,00	0	<b>3332,20</b>	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	3262,20	7	0,00	0	0,00	0	<b>3332,20</b>	0,52
5	SCH	3955,99	11	0,00	0	0,00	0	4065,99	13,70
	NNH	4023,79	10	43,44	16	0,00	0	4167,23	0,25
	IH	3862,95	12	176,87	10	0,00	0	4159,82	36,65
	I2PH	3771,65	12	0,00	0	0,00	0	<b>3891,65</b>	0,14
	I <sup>2</sup> 2PH	3771,65	12	0,00	0	0,00	0	<b>3891,65</b>	0,48
6	SCH	3791,53	12	0,00	0	0,00	0	3911,53	13,69
	NNH	3990,22	8	52,59	15	0,00	0	4122,80	0,26
	IH	3756,41	10	89,58	9	0,00	0	3945,99	37,45
	I2PH	3447,95	11	0,00	0	0,00	0	<b>3557,95</b>	0,14
	I <sup>2</sup> 2PH	3447,95	11	0,00	0	0,00	0	<b>3557,95</b>	0,48
7	SCH	3941,94	11	0,00	0	0,00	0	4051,94	13,73
	NNH	3933,59	10	34,68	14	0,00	0	4068,27	0,26
	IH	3835,28	10	100,38	13	0,00	0	4035,66	36,97
	I2PH	3590,34	11	0,00	0	0,00	0	<b>3700,34</b>	0,12
	I <sup>2</sup> 2PH	3590,34	11	0,00	0	0,00	0	<b>3700,34</b>	0,48
8	SCH	3302,96	7	0,00	0	0,00	0	3372,96	14,12
	NNH	3603,52	7	24,52	5	0,00	0	3698,04	0,25
	IH	3397,81	6	18,89	3	0,00	0	3476,70	37,73
	I2PH	3218,03	6	0,00	0	0,00	0	<b>3278,03</b>	0,14
	I <sup>2</sup> 2PH	3218,03	6	0,00	0	0,00	0	<b>3278,03</b>	0,52
9	SCH	3717,08	10	0,00	0	0,00	0	3817,08	14,86
	NNH	3655,06	9	67,33	16	0,00	0	3812,39	0,27
	IH	3500,84	10	162,50	11	0,00	0	3763,34	38,38
	I2PH	3437,83	12	0,00	0	0,00	0	<b>3557,83</b>	0,14
	I <sup>2</sup> 2PH	3437,83	12	0,00	0	0,00	0	<b>3557,83</b>	0,52

TABLA 9.7: Comparativa de heurísticas en entornos deterministas y estáticos  
Clase RC1 y 25 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
1	SCH	1431,39	9	1,27	1	0,00	0	<b>1522,66</b>	0,23
	NNH	1470,17	12	11,67	2	0,00	0	1601,85	0,04
	IH	1488,22	8	13,60	5	0,00	0	1581,82	0,71
	I2PH	1461,39	10	0,00	0	0,00	0	1561,39	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	1461,39	10	0,00	0	0,00	0	1561,39	0,10
2	SCH	1177,52	8	0,00	0	0,00	0	1257,52	0,23
	NNH	1264,94	7	10,78	2	0,00	0	1345,72	0,04
	IH	1412,44	7	11,68	2	0,00	0	1494,12	0,68
	I2PH	1177,52	7	0,00	0	0,00	0	<b>1247,52</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	1177,52	7	0,00	0	0,00	0	<b>1247,52</b>	0,06
3	SCH	1153,75	6	0,00	0	0,00	0	<b>1213,75</b>	0,24
	NNH	1268,93	5	5,41	1	0,00	0	1324,34	0,04
	IH	1309,96	6	0,00	0	0,00	0	1369,96	0,68
	I2PH	1152,29	7	0,00	0	0,00	0	1222,29	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	1152,29	7	0,00	0	0,00	0	1222,29	0,06
4	SCH	1072,62	7	0,00	0	0,00	0	1142,62	0,24
	NNH	1138,24	5	0,00	0	0,00	0	1188,24	0,03
	IH	1170,52	6	0,00	0	0,00	0	1230,52	0,67
	I2PH	1072,62	6	0,00	0	0,00	0	<b>1132,62</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	1072,62	6	0,00	0	0,00	0	<b>1132,62</b>	0,06
5	SCH	1344,02	10	0,00	0	0,00	0	<b>1444,02</b>	0,23
	NNH	1423,22	9	2,60	2	0,00	0	1515,82	0,04
	IH	1509,55	8	18,70	5	0,00	0	1608,25	0,71
	I2PH	1345,62	11	0,00	0	0,00	0	1455,62	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	1345,62	11	0,00	0	0,00	0	1455,62	0,06
6	SCH	1344,75	8	0,00	0	0,00	0	1424,75	0,23
	NNH	1494,78	9	3,73	1	0,00	0	1588,52	0,04
	IH	1235,95	9	0,00	0	0,00	0	<b>1325,95</b>	0,71
	I2PH	1344,75	9	0,00	0	0,00	0	1434,75	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	1344,75	9	0,00	0	0,00	0	1434,75	0,06
7	SCH	1214,56	10	1,40	1	0,00	0	1315,96	0,23
	NNH	1337,02	7	6,90	4	0,00	0	1413,92	0,04
	IH	1480,99	7	1,65	1	0,00	0	1552,65	0,70
	I2PH	1214,56	9	0,00	0	0,00	0	<b>1304,56</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	1214,56	9	0,00	0	0,00	0	<b>1304,56</b>	0,06
8	SCH	1159,86	9	0,00	0	0,00	0	1249,86	0,23
	NNH	1481,15	8	0,19	1	0,00	0	1561,34	0,04
	IH	1535,75	7	0,00	0	0,00	0	1605,75	0,70
	I2PH	1159,86	8	0,00	0	0,00	0	<b>1239,86</b>	0,03
	I <sup>2</sup> 2PH	1159,86	8	0,00	0	0,00	0	<b>1239,86</b>	0,06



TABLA 9.8: Comparativa de heurísticas en entornos deterministas y estáticos  
Clase RC1 y 50 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
1	SCH	3027,36	21	0,00	0	0,00	0	<b>3237,36</b>	1,63
	NNH	3254,61	25	15,84	5	0,00	0	3520,45	0,08
	IH	3013,80	21	16,27	5	0,00	0	3240,07	5,07
	I2PH	3039,08	22	0,00	0	0,00	0	3259,08	0,07
	I <sup>2</sup> 2PH	3039,08	22	0,00	0	0,00	0	3259,08	0,17
2	SCH	2524,83	16	3,60	1	0,00	0	<b>2688,43</b>	1,68
	NNH	2953,09	19	13,06	5	0,00	0	3156,15	0,08
	IH	2882,21	14	46,66	9	0,00	0	3068,87	4,87
	I2PH	2582,73	17	0,00	0	0,00	0	2752,73	0,07
	I <sup>2</sup> 2PH	2582,73	17	0,00	0	0,00	0	2752,73	0,16
3	SCH	2405,51	14	0,00	0	0,00	0	2545,51	1,69
	NNH	2685,69	13	6,47	1	0,00	0	2822,16	0,08
	IH	2851,66	12	8,93	3	0,00	0	2980,60	4,86
	I2PH	2339,73	13	0,00	0	0,00	0	<b>2469,73</b>	0,07
	I <sup>2</sup> 2PH	2339,73	13	0,00	0	0,00	0	<b>2469,73</b>	0,16
4	SCH	2221,28	11	0,00	0	0,00	0	2331,28	1,79
	NNH	2522,48	10	2,11	1	0,00	0	2624,60	0,08
	IH	2446,84	11	0,00	0	0,00	0	2556,84	4,80
	I2PH	2224,48	10	0,00	0	0,00	0	<b>2324,48</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	2224,48	10	0,00	0	0,00	0	<b>2324,48</b>	0,14
5	SCH	2927,77	19	6,88	1	0,00	0	3124,65	1,69
	NNH	3264,91	19	4,15	6	0,00	0	3459,06	0,09
	IH	3214,80	17	14,53	7	0,00	0	3399,33	5,05
	I2PH	2936,74	17	0,00	0	0,00	0	<b>3106,74</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	2936,74	17	0,00	0	0,00	0	<b>3106,74</b>	0,16
6	SCH	2852,50	18	5,88	1	0,00	0	3038,37	1,76
	NNH	3373,17	21	1,65	2	0,00	0	3584,82	0,08
	IH	2979,27	17	12,36	4	0,00	0	3161,63	5,03
	I2PH	2867,95	17	0,00	0	0,00	0	<b>3037,95</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	2867,95	17	0,00	0	0,00	0	<b>3037,95</b>	0,16
7	SCH	2395,24	20	0,00	0	0,00	0	2595,24	1,69
	NNH	3086,29	16	10,98	5	0,00	0	3257,26	0,09
	IH	2766,39	16	14,06	3	0,00	0	2940,45	4,99
	I2PH	2398,90	19	0,00	0	0,00	0	<b>2588,90</b>	0,06
	I <sup>2</sup> 2PH	2398,90	19	0,00	0	0,00	0	<b>2588,90</b>	0,15
8	SCH	2324,84	18	0,00	0	0,00	0	<b>2504,84</b>	1,91
	NNH	3002,56	15	7,94	2	0,00	0	3160,50	0,08
	IH	2926,24	15	5,78	2	0,00	0	3082,02	4,98
	I2PH	2324,84	18	0,00	0	0,00	0	<b>2504,84</b>	0,07
	I <sup>2</sup> 2PH	2324,84	18	0,00	0	0,00	0	<b>2504,84</b>	0,15

TABLA 9.9: Comparativa de heurísticas en entornos deterministas y estáticos  
Clase RC1 y 100 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC	Time
1	SCH	4524,20	36	10,82	2	0,00	0	<b>4895,02</b>	12,91
	NNH	4996,83	35	34,60	12	0,00	0	5381,43	0,26
	IH	5076,03	35	82,73	11	0,00	0	5498,76	37,16
	I2PH	4542,85	39	0,00	0	0,00	0	4932,85	0,21
	I <sup>2</sup> 2PH	4542,85	39	0,00	0	0,00	0	4932,85	0,49
2	SCH	4049,96	27	3,37	2	0,00	0	<b>4323,33</b>	13,27
	NNH	4869,03	27	6,45	8	0,00	0	5145,47	0,27
	IH	4746,86	24	31,74	9	0,00	0	5018,60	37,84
	I2PH	4085,49	27	0,00	0	0,00	0	4355,49	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	4085,49	27	0,00	0	0,00	0	4355,49	0,48
3	SCH	3971,08	23	0,00	0	0,00	0	4201,08	13,38
	NNH	4400,07	20	7,72	4	0,00	0	4607,80	0,26
	IH	4657,17	21	12,33	3	0,00	0	4879,51	43,37
	I2PH	3773,58	23	0,00	0	0,00	0	<b>4003,58</b>	0,12
	I <sup>2</sup> 2PH	3773,58	23	0,00	0	0,00	0	<b>4003,58</b>	0,52
4	SCH	3786,61	19	0,00	0	0,00	0	<b>3976,61</b>	13,43
	NNH	4446,34	19	10,03	5	0,00	0	4646,37	0,26
	IH	4124,16	19	27,61	2	0,00	0	4341,77	40,21
	I2PH	3786,61	19	0,00	0	0,00	0	<b>3976,61</b>	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	3786,61	19	0,00	0	0,00	0	<b>3976,61</b>	0,52
5	SCH	4624,89	33	7,83	1	0,00	0	<b>4962,73</b>	13,05
	NNH	5295,82	31	29,98	14	0,00	0	5635,79	0,26
	IH	5230,93	30	52,57	9	0,00	0	5583,51	42,21
	I2PH	4646,74	33	0,00	0	0,00	0	4976,74	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	4646,74	33	0,00	0	0,00	0	4976,74	0,50
6	SCH	4289,88	31	0,00	0	0,00	0	<b>4599,88</b>	13,15
	NNH	5137,72	30	5,14	10	0,00	0	5442,87	0,26
	IH	4796,07	29	33,68	10	0,00	0	5119,75	41,01
	I2PH	4289,88	31	0,00	0	0,00	0	<b>4599,88</b>	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	4289,88	31	0,00	0	0,00	0	<b>4599,88</b>	0,47
7	SCH	3946,73	31	2,72	1	0,00	0	4259,45	13,11
	NNH	4851,54	26	11,79	14	0,00	0	5123,33	0,27
	IH	4861,72	25	25,52	7	0,00	0	5137,24	39,69
	I2PH	3918,02	31	0,00	0	0,00	0	<b>4228,02</b>	0,13
	I <sup>2</sup> 2PH	3918,02	31	0,00	0	0,00	0	<b>4228,02</b>	0,49
8	SCH	3814,27	30	0,00	0	0,00	0	4114,27	13,16
	NNH	4831,99	25	9,42	4	0,00	0	5091,41	0,27
	IH	4887,08	25	11,54	2	0,00	0	5148,61	39,83
	I2PH	3784,80	29	0,00	0	0,00	0	<b>4074,80</b>	0,12
	I <sup>2</sup> 2PH	3784,80	29	0,00	0	0,00	0	<b>4074,80</b>	0,50

TABLA 9.10: Heurísticas en entornos deterministas y estáticos - Costes medios por tarea

Clase	Heurística	Número de tareas			
		25	50	100	Media
R1	SCH	476,63	454,29	409,28	446,74
	NNH	518,40	515,52	466,87	500,26
	IH	524,32	521,73	478,56	508,20
	I2PH	465,71	450,62	403,41	439,91
	I <sup>2</sup> 2PH	465,71	450,62	403,22	<b>439,85</b>
C1	SCH	290,52	298,37	351,91	313,60
	NNH	292,57	307,20	369,06	322,94
	IH	279,57	301,99	353,62	311,73
	I2PH	264,30	275,75	322,80	<b>287,62</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	264,30	275,75	322,80	<b>287,62</b>
RC1	SCH	422,85	441,31	353,32	405,83
	NNH	461,59	511,70	410,74	461,34
	IH	470,76	488,60	409,28	456,21
	I2PH	423,94	440,89	351,48	<b>405,44</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	423,94	440,89	351,48	<b>405,44</b>
Media	SCH	396,67	397,99	371,51	388,72
	NNH	424,19	444,81	415,56	428,18
	IH	424,88	437,44	413,82	425,38
	I2PH	<b>384,65</b>	<b>389,09</b>	<b>359,23</b>	377,66
	I <sup>2</sup> 2PH	<b>384,65</b>	<b>389,09</b>	<b>359,17</b>	<b>377,63</b>

Las tablas anteriores muestran los resultados para las diferentes heurísticas (heurística de ahorro en costes, SCH; Heurística de vecino más cercano, NNH; heurística de inserción, IH; heurística de inserción en dos fases, I2PH; y heurística iterativa de inserción en dos fases, I<sup>2</sup>2PH) haciendo uso de los mejores parámetros encontrados para las mismas en el Capítulo 7; es decir, en el caso de SCH se usó un MAXWAITING de 65 minutos, de NNH fue testada su variante paralelo con unos pesos [10 1 1 5 10 10], de la heurística IH se escogió la opción B con unos pesos [1 1 1 0,01], y tanto I2PH como I<sup>2</sup>2PH tomaron un MAXWAITING de 45 minutos.

Los resultados demuestran que, salvo en contadas ocasiones, la heurística I<sup>2</sup>2PH y I2PH son las que mejores resultados muestran, de las demás podría destacarse SCH. Si se observa la Tabla 9.10, que contiene los resultados medios por tarea para los diferentes clases de problemas y diferentes tamaños de problemas, en todos los casos las heurísticas I2PH y I<sup>2</sup>2PH son las que mejor comportamiento medio presentan.

Como ya se comentó anteriormente, I<sup>2</sup>2PH y I2PH están basadas en los mismos principios, siendo la primera modificada para algunas situaciones que suelen darse en entornos dinámicos; dado que las tablas anteriores han sido testeadas en un entorno estático, donde no existen reoptimizaciones, es lógica la similitud de resultados. En algunas ocasiones I<sup>2</sup>2PH mejora sobre I2PH debido principalmente al aumento del número de reiteraciones.

Las tablas muestran también el tiempo de ejecución de cada una de las heurísticas para cada uno de los problemas de la batería. Es importante destacar que NNH, I2PH

y I<sup>2</sup>2PH presentan mejores prestaciones en este sentido que IH y SCH. Este tiempo puede ser determinante en entornos dinámicos, donde el tiempo de respuesta ha de ser suficientemente bajo.

## 9.2. Comparativa de las heurísticas en entornos estocásticos y sin reoptimización

Una vez estudiado el rendimiento de las heurísticas para el caso más favorable, es decir, en el caso que los tiempos de tránsito reales coincidan exactamente con los tiempos programados, es importante ver cómo se comportan las mismas en el caso de que estos tiempos puedan sufrir alteraciones sobre su media.

Para realizar los experimentos se diseñó, según se expone en el Apéndice A, un procedimiento que simula situaciones de incertidumbre en los tiempos de tránsito. En el mismo se divide el espacio donde se encuentran las tareas a realizar en un número de sectores, de los cuales se conoce la media y la desviación pero no el valor real de la velocidad. Para evitar convertir el problema bajo estudio en un problema de búsqueda de la ruta mínima en entornos estocásticos, se supuso que dicha función de probabilidad sería la misma en cada uno de los sectores. Cada test fue testeado sobre 100 escenarios de tráfico distintos.

El resultado de los mismos se encuentra en las siguientes tablas: las Tablas 9.11, 9.12 y 9.13 muestran los resultados para la clase R1; las Tablas 9.14, 9.15 y 9.16 para la clase C1; y las Tablas 9.17, 9.18 y 9.19 para la clase RC1. Por último, la Tabla 9.20 muestra los costes medios por tarea siguiendo las mismas pautas que la Tabla 9.10.

En este caso, se pueden observar varias cuestiones remarcables. Primero, que como es lógico, todas las soluciones empeoran, debido a que las muchas tareas no se atienden dentro del tiempo requerido; segundo, que la heurística que mejor resultado presenta ante un problema en un entorno estático no tiene por qué serlo también en el entorno estocástico; y tercero, que ahora además de las heurísticas I<sup>2</sup>2PH, I2PH cobra también un papel importante la heurística de ahorro en costes, SCH. Analizando la Tabla 9.20, aunque SCH aparece como la heurística con mejor rendimiento en algunos test particulares, de media las heurísticas I2PH y I<sup>2</sup>2PH siguen siendo las que mejor rendimiento proporcional; más aún teniendo en cuenta los costes computacionales.

TABLA 9.11: Comparativa de heurísticas en entornos estocásticos y estáticos  
Clase R1 y 25 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC
1	SCH	984,40	9	12,00	2,00	239,60	2,40	1326,01
	NNH	998,86	10	19,05	4,52	271,29	2,71	1389,19
	IH	1055,04	10	20,19	3,43	164,36	1,64	1339,59
	I2PH	984,40	10	0,00	0,00	217,82	2,18	<b>1302,23</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	984,40	10	0,00	0,00	217,82	2,18	<b>1302,23</b>
2	SCH	998,82	7	8,60	1,21	88,12	0,88	1165,54
	NNH	1058,91	8	3,92	1,45	102,97	1,03	1245,80
	IH	1057,63	9	5,55	1,66	155,45	1,55	1308,63
	I2PH	961,44	7	0,11	0,17	58,42	0,58	<b>1089,96</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	961,44	7	0,11	0,17	58,42	0,58	<b>1089,96</b>
3	SCH	848,03	7	0,00	0,00	45,54	0,46	<b>963,57</b>
	NNH	935,97	6	0,42	0,22	263,37	2,63	1259,75
	IH	947,91	6	10,67	1,42	238,61	2,39	1257,19
	I2PH	821,66	7	1,10	0,43	103,96	1,04	996,72
	I <sup>2</sup> 2PH	821,66	7	1,10	0,43	103,96	1,04	996,72
4	SCH	853,85	6	0,07	0,04	28,71	0,29	942,64
	NNH	922,19	6	1,17	0,50	141,58	1,42	1124,95
	IH	983,86	6	0,43	0,22	105,94	1,06	1150,24
	I2PH	810,31	5	0,08	0,08	46,53	0,47	<b>906,93</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	810,31	5	0,08	0,08	46,53	0,47	<b>906,93</b>
5	SCH	986,21	9	0,46	0,18	207,92	2,08	1284,58
	NNH	1051,54	9	10,97	2,52	66,34	0,66	<b>1218,84</b>
	IH	1090,41	8	16,91	1,83	128,71	1,29	1316,03
	I2PH	974,28	8	0,13	0,07	184,16	1,84	1238,57
	I <sup>2</sup> 2PH	974,28	8	0,13	0,07	184,16	1,84	1238,57
6	SCH	950,12	7	0,27	0,19	79,21	0,79	<b>1099,60</b>
	NNH	1060,60	7	4,31	1,38	198,02	1,98	1332,93
	IH	993,92	6	4,74	1,15	153,47	1,53	1212,13
	I2PH	940,58	7	0,52	0,35	131,68	1,32	1142,78
	I <sup>2</sup> 2PH	940,58	7	0,52	0,35	131,68	1,32	1142,78
7	SCH	952,27	7	0,34	0,16	76,24	0,76	<b>1098,85</b>
	NNH	993,84	6	10,66	2,04	131,68	1,32	1196,18
	IH	1021,50	5	9,41	1,46	194,06	1,94	1274,96
	I2PH	925,33	7	0,26	0,16	108,91	1,09	1114,50
	I <sup>2</sup> 2PH	925,33	7	0,26	0,16	108,91	1,09	1114,50
8	SCH	936,01	6	0,55	0,40	67,33	0,67	1063,88
	NNH	1020,74	5	10,77	2,29	46,53	0,47	1128,04
	IH	948,02	5	3,95	1,45	46,53	0,47	<b>1048,51</b>
	I2PH	898,25	6	1,11	0,44	99,01	0,99	1068,37
	I <sup>2</sup> 2PH	898,25	6	1,11	0,44	99,01	0,99	1068,37
9	SCH	885,21	7	7,28	1,00	140,59	1,41	<b>1103,09</b>
	NNH	1075,75	7	9,39	2,74	93,07	0,93	1248,21
	IH	1089,70	6	12,76	2,45	213,86	2,14	1376,32
	I2PH	885,21	6	1,27	0,73	184,16	1,84	1130,64
	I <sup>2</sup> 2PH	885,21	6	1,27	0,73	184,16	1,84	1130,64
10	SCH	837,67	8	0,18	0,20	107,92	1,08	<b>1025,77</b>
	NNH	976,67	7	13,39	2,13	155,45	1,55	1215,50
	IH	1007,36	6	10,39	1,65	213,86	2,14	1291,60
	I2PH	837,67	7	0,01	0,01	121,78	1,22	1029,45
	I <sup>2</sup> 2PH	837,67	7	0,01	0,01	121,78	1,22	1029,45
11	SCH	894,80	7	3,05	0,78	151,49	1,51	<b>1119,34</b>
	NNH	991,66	6	7,85	2,16	71,29	0,71	1130,80
	IH	1084,98	6	5,85	1,44	200,99	2,01	1351,82
	I2PH	892,54	7	0,91	0,43	182,18	1,82	1145,63
	I <sup>2</sup> 2PH 2	892,54	7	0,91	0,43	182,18	1,82	1145,63
12	SCH	891,15	7	0,05	0,03	95,05	0,95	1056,25
	NNH	986,91	6	10,19	1,95	80,20	0,80	1137,30
	IH	962,01	6	5,27	0,97	128,71	1,29	1155,99
	I2PH	891,15	6	1,67	0,64	42,57	0,43	<b>995,40</b>
	I <sup>2</sup> 2PH 2	891,15	6	1,67	0,64	42,57	0,43	<b>995,40</b>

TABLA 9.12: Comparativa de heurísticas en entornos estocásticos y estáticos  
Clase R1 y 50 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC
1	SCH	1905,13	20	4,88	1,54	327,72	3,28	2437,73
	NNH	2024,88	21	43,99	8,99	328,71	3,29	2607,58
	IH	2158,12	18	82,65	9,19	372,28	3,72	2793,05
	I2PH	1905,13	20	0,20	0,20	331,68	3,32	<b>2437,01</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1905,13	20	0,20	0,20	331,68	3,32	<b>2437,01</b>
2	SCH	1855,63	14	1,34	1,24	176,24	1,76	2173,20
	NNH	2058,60	15	20,77	6,78	186,14	1,86	2415,51
	IH	2139,58	13	77,29	10,04	265,35	2,65	2612,22
	I2PH	1832,18	14	0,07	0,09	150,50	1,50	<b>2122,75</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1832,18	14	0,07	0,09	150,50	1,50	<b>2122,75</b>
3	SCH	1724,03	13	7,16	2,51	160,40	1,60	2021,58
	NNH	1958,29	11	21,96	6,07	293,07	2,93	2383,32
	IH	1837,06	11	75,71	9,53	417,82	4,18	2440,58
	I2PH	1682,02	14	1,30	0,83	156,44	1,56	<b>1979,76</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1682,02	14	1,30	0,83	156,44	1,56	<b>1979,76</b>
4	SCH	1701,87	10	0,36	0,26	166,34	1,66	1968,57
	NNH	1828,01	10	1,75	0,82	159,41	1,59	2089,16
	IH	1882,42	11	7,09	1,51	213,86	2,14	2213,37
	I2PH	1646,42	9	0,62	0,41	159,41	1,59	<b>1896,44</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1646,42	9	0,62	0,41	159,41	1,59	<b>1896,44</b>
5	SCH	1888,44	16	1,36	0,54	353,47	3,53	2403,27
	NNH	2086,94	14	35,81	8,26	370,30	3,70	2633,05
	IH	2122,28	13	56,59	7,19	357,43	3,57	2666,30
	I2PH	1889,10	17	0,13	0,13	272,28	2,72	<b>2331,51</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1889,10	17	0,13	0,13	272,28	2,72	<b>2331,51</b>
6	SCH	1759,77	13	0,79	0,62	235,64	2,36	2126,20
	NNH	2044,22	12	34,17	8,39	342,57	3,43	2540,97
	IH	2069,55	12	51,22	8,05	266,34	2,66	2507,10
	I2PH	1752,30	14	2,43	1,42	190,10	1,90	<b>2084,83</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1752,30	14	2,43	1,42	190,10	1,90	<b>2084,83</b>
7	SCH	1726,44	11	0,20	0,24	191,09	1,91	<b>2027,72</b>
	NNH	2014,69	10	15,24	3,89	441,58	4,42	2571,51
	IH	1969,18	11	2,96	1,19	293,07	2,93	2375,21
	I2PH	1732,53	12	2,85	1,20	205,94	2,06	2061,32
	I <sup>2</sup> 2PH	1732,53	12	2,85	1,20	205,94	2,06	2061,32
8	SCH	1672,95	9	1,68	0,67	171,29	1,71	<b>1935,92</b>
	NNH	1861,68	9	10,51	2,66	204,95	2,05	2167,14
	IH	1853,30	9	8,92	1,96	261,39	2,61	2213,61
	I2PH	1641,36	10	2,73	1,12	195,05	1,95	1939,14
	I <sup>2</sup> 2PH	1641,36	10	2,73	1,12	195,05	1,95	1939,14
9	SCH	1734,84	14	0,62	0,41	347,52	3,48	<b>2222,99</b>
	NNH	2071,42	12	32,03	7,16	392,08	3,92	2615,53
	IH	2145,27	12	22,43	4,45	564,36	5,64	2852,06
	I2PH	1730,93	15	0,69	0,47	386,14	3,86	2267,75
	I <sup>2</sup> 2PH	1730,93	15	0,69	0,47	386,14	3,86	2267,75
10	SCH	1715,73	13	3,49	1,16	347,52	3,48	2196,75
	NNH	2109,75	13	17,21	4,87	215,84	2,16	2472,81
	IH	2025,39	11	19,56	4,87	354,46	3,54	2509,41
	I2PH	1713,99	12	4,85	2,24	258,42	2,58	<b>2097,25</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1713,99	12	4,85	2,24	258,42	2,58	<b>2097,25</b>
11	SCH	1768,67	14	1,73	0,70	208,91	2,09	<b>2119,31</b>
	NNH	2119,81	12	24,32	5,54	267,33	2,67	2531,46
	IH	2111,29	11	23,01	4,78	364,36	3,64	2608,65
	I2PH	1731,21	14	1,68	0,87	288,12	2,88	2161,00
	I <sup>2</sup> 2PH	1731,21	14	1,68	0,87	288,12	2,88	2161,00
12	SCH	1643,63	14	0,00	0,00	242,57	2,43	<b>2026,21</b>
	NNH	1931,29	12	13,08	3,29	187,13	1,87	2251,50
	IH	1904,07	10	28,22	5,29	357,43	3,57	2389,72
	I2PH	1643,63	12	2,70	1,23	301,98	3,02	2068,31
	I <sup>2</sup> 2PH	1643,63	12	2,70	1,23	301,98	3,02	2068,31

TABLA 9.13: Comparativa de heurísticas en entornos estocásticos y estáticos  
Clase R1 y 100 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC
1	SCH	3578,95	36	32,70	5,44	584,16	5,84	4555,81
	NNH	3800,30	37	54,37	17,52	727,72	7,28	4952,39
	IH	4111,29	30	188,23	27,32	710,89	7,11	5310,41
	I2PH	3584,44	40	1,92	1,46	485,15	4,85	4471,51
	I <sup>2</sup> 2PH	3565,49	40	2,00	1,50	491,09	4,91	<b>4458,57</b>
2	SCH	3371,00	26	11,33	4,44	505,94	5,06	4148,28
	NNH	3863,10	28	46,82	15,29	469,31	4,69	4659,23
	IH	4101,50	25	67,42	17,20	653,47	6,53	5072,39
	I2PH	3330,61	25	4,52	2,98	535,64	5,36	<b>4120,78</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3330,61	25	4,52	2,98	535,64	5,36	<b>4120,78</b>
3	SCH	3146,50	21	8,56	3,96	426,73	4,27	<b>3791,80</b>
	NNH	3548,52	21	27,80	9,70	383,17	3,83	4169,49
	IH	3546,52	20	81,19	13,64	544,55	5,45	4372,27
	I2PH	3045,01	21	4,44	1,70	577,23	5,77	3836,68
	I <sup>2</sup> 2PH	3045,01	21	4,44	1,70	577,23	5,77	3836,68
4	SCH	3066,58	18	1,82	1,33	278,22	2,78	3526,62
	NNH	3346,82	17	22,99	6,05	426,73	4,27	3966,55
	IH	3325,75	18	5,36	2,40	548,51	5,49	4059,62
	I2PH	2923,68	18	0,94	0,42	176,24	1,76	<b>3280,86</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	2923,68	18	0,94	0,42	176,24	1,76	<b>3280,86</b>
5	SCH	3310,08	28	13,69	5,24	833,66	8,34	4437,43
	NNH	3812,44	25	51,83	17,33	513,86	5,14	4628,13
	IH	3879,07	24	84,53	16,37	648,51	6,49	4852,11
	I2PH	3310,77	28	4,23	2,96	630,69	6,31	<b>4225,69</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3310,77	28	4,23	2,96	630,69	6,31	<b>4225,69</b>
6	SCH	3240,81	23	5,33	2,47	344,55	3,45	<b>3820,69</b>
	NNH	3735,25	24	41,31	14,31	562,38	5,62	4578,94
	IH	3996,43	23	36,83	10,65	454,46	4,54	4717,72
	I2PH	3206,42	22	6,29	2,77	412,87	4,13	3845,58
	I <sup>2</sup> 2PH	3206,42	22	6,29	2,77	412,87	4,13	3845,58
7	SCH	3108,52	20	3,63	1,60	349,50	3,50	<b>3661,65</b>
	NNH	3457,97	18	32,65	9,06	553,47	5,53	4224,08
	IH	3513,02	18	55,18	9,11	478,22	4,78	4226,42
	I2PH	3013,28	19	10,13	4,32	612,87	6,13	3826,27
	I <sup>2</sup> 2PH	3013,28	19	10,13	4,32	612,87	6,13	3826,27
8	SCH	2966,61	18	1,61	0,68	190,10	1,90	<b>3338,33</b>
	NNH	3444,17	17	27,58	7,28	396,04	3,96	4037,79
	IH	3198,79	17	19,17	3,07	400,99	4,01	3788,95
	I2PH	2924,06	20	2,78	1,30	356,44	3,56	3483,28
	I <sup>2</sup> 2PH	2924,06	20	2,78	1,30	356,44	3,56	3483,28
9	SCH	3117,19	24	4,18	2,25	741,58	7,42	4102,96
	NNH	3700,28	26	53,78	15,15	420,79	4,21	4434,85
	IH	3729,09	22	55,44	11,49	765,35	7,65	4769,87
	I2PH	3112,27	23	3,66	2,26	673,27	6,73	<b>4019,20</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3112,27	23	3,66	2,26	673,27	6,73	<b>4019,20</b>
10	SCH	3021,11	25	0,66	0,46	715,84	7,16	<b>3987,61</b>
	NNH	3728,30	22	37,48	11,65	444,55	4,45	4430,33
	IH	3675,37	21	37,60	9,01	782,18	7,82	4705,15
	I2PH	2976,53	22	8,67	3,72	887,13	8,87	4092,32
	I <sup>2</sup> 2PH	2976,53	22	8,67	3,72	887,13	8,87	4092,32
11	SCH	3166,60	24	6,26	3,26	540,59	5,41	<b>3953,46</b>
	NNH	3619,66	21	46,58	11,80	624,75	6,25	4500,99
	IH	3817,45	21	37,76	6,64	647,52	6,48	4712,74
	I2PH	3154,99	23	4,79	2,88	893,07	8,93	4282,85
	I <sup>2</sup> 2PH	3154,99	23	4,79	2,88	893,07	8,93	4282,85
12	SCH	2918,70	24	1,22	0,55	562,38	5,62	<b>3722,30</b>
	NNH	3683,10	20	34,41	7,64	476,24	4,76	4393,75
	IH	3637,56	20	28,29	6,24	647,52	6,48	4513,37
	I2PH	2918,70	23	8,07	2,86	705,94	7,06	3862,71
	I <sup>2</sup> 2PH	2918,70	23	8,07	2,86	705,94	7,06	3862,71

TABLA 9.14: Comparativa de heurísticas en entornos estocásticos y estáticos  
Clase C1 y 25 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC
1	SCH	807,66	4	4,80	1,48	242,57	2,43	1095,04
	NNH	772,51	4	22,56	4,51	208,91	2,09	1043,98
	IH	734,54	4	37,27	3,63	54,46	0,54	<b>866,26</b>
	I2PH	807,13	3	0,05	0,12	83,17	0,83	920,35
	I <sup>2</sup> 2PH	807,13	3	0,05	0,12	83,17	0,83	920,35
2	SCH	721,12	5	0,01	0,01	136,63	1,37	907,76
	NNH	767,68	2	1,01	0,42	145,54	1,46	934,24
	IH	734,39	4	15,19	2,04	67,33	0,67	856,91
	I2PH	668,13	4	0,32	0,22	120,79	1,21	<b>829,24</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	668,13	4	0,32	0,22	120,79	1,21	<b>829,24</b>
3	SCH	740,96	2	8,94	1,36	70,30	0,70	840,20
	NNH	898,47	2	40,89	4,03	119,80	1,20	1079,17
	IH	741,64	3	18,51	2,88	67,33	0,67	857,48
	I2PH	643,46	3	0,03	0,03	0,00	0,00	<b>673,50</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	643,46	3	0,03	0,03	0,00	0,00	<b>673,50</b>
4	SCH	778,19	5	0,50	0,17	111,88	1,12	940,57
	NNH	773,64	2	7,72	0,85	85,15	0,85	886,50
	IH	668,99	2	6,03	0,77	51,49	0,51	746,51
	I2PH	655,82	2	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>675,82</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	655,82	2	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>675,82</b>
5	SCH	770,21	3	0,16	0,03	139,60	1,40	939,98
	NNH	712,11	3	12,14	3,44	88,12	0,88	842,37
	IH	784,12	3	14,81	1,41	202,97	2,03	1031,90
	I2PH	737,16	3	0,00	0,00	66,34	0,66	<b>833,50</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	737,16	3	0,00	0,00	66,34	0,66	<b>833,50</b>
6	SCH	879,44	6	0,00	0,00	85,15	0,85	1024,59
	NNH	780,07	4	8,51	2,51	68,32	0,68	<b>896,90</b>
	IH	720,36	4	11,92	2,83	147,52	1,48	919,81
	I2PH	809,91	3	1,39	0,56	88,12	0,88	929,41
	I <sup>2</sup> 2PH	809,91	3	1,39	0,56	88,12	0,88	929,41
7	SCH	795,10	4	3,63	0,82	148,51	1,49	987,25
	NNH	772,13	2	7,31	1,51	130,69	1,31	930,14
	IH	795,18	3	16,07	1,52	143,56	1,44	984,81
	I2PH	728,59	3	0,93	0,53	0,99	0,01	<b>760,51</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	728,59	3	0,93	0,53	0,99	0,01	<b>760,51</b>
8	SCH	652,91	3	0,43	0,05	16,83	0,17	700,18
	NNH	741,15	3	0,00	0,00	67,33	0,67	838,48
	IH	684,28	2	1,43	0,17	25,74	0,26	731,45
	I2PH	632,36	2	0,00	0,00	12,87	0,13	<b>665,23</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	632,36	2	0,00	0,00	12,87	0,13	<b>665,23</b>
9	SCH	769,24	2	0,27	0,11	107,92	1,08	897,43
	NNH	786,72	3	18,65	1,86	132,67	1,33	968,05
	IH	751,06	2	5,34	0,89	130,69	1,31	907,09
	I2PH	654,89	4	0,07	0,04	0,00	0,00	<b>694,96</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	654,89	4	0,07	0,04	0,00	0,00	<b>694,96</b>



TABLA 9.15: Comparativa de heurísticas en entornos estocásticos y estáticos  
Clase C1 y 50 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC
1	SCH	1617,20	9	4,21	1,63	356,44	3,56	2067,85
	NNH	1593,43	5	61,08	10,40	293,07	2,93	1997,58
	IH	1599,59	7	94,79	5,75	286,14	2,86	2050,52
	I2PH	1586,60	6	0,06	0,13	155,45	1,55	<b>1802,10</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1586,60	6	0,06	0,13	155,45	1,55	<b>1802,10</b>
2	SCH	1580,41	8	1,35	0,58	291,09	2,91	1952,84
	NNH	1607,42	5	44,47	7,91	319,80	3,20	2021,69
	IH	1669,24	5	55,97	5,16	330,69	3,31	2105,90
	I2PH	1451,34	5	1,59	0,82	238,61	2,39	<b>1741,55</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1451,34	5	1,59	0,82	238,61	2,39	<b>1741,55</b>
3	SCH	1612,23	8	1,38	0,61	73,27	0,73	1766,87
	NNH	1842,55	4	34,93	5,27	135,64	1,36	2053,12
	IH	1587,26	4	33,38	5,04	269,31	2,69	1929,94
	I2PH	1394,43	5	2,17	0,96	163,37	1,63	<b>1609,97</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1394,43	5	2,17	0,96	163,37	1,63	<b>1609,97</b>
4	SCH	1627,48	4	3,29	0,33	190,10	1,90	1860,87
	NNH	1672,65	7	34,34	2,82	103,96	1,04	1880,95
	IH	1489,67	4	28,91	1,23	252,48	2,52	1811,06
	I2PH	1433,97	4	1,69	0,38	60,40	0,60	<b>1536,06</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1433,97	4	1,69	0,38	60,40	0,60	<b>1536,06</b>
5	SCH	1631,14	6	4,71	0,94	353,47	3,53	2049,32
	NNH	1644,11	5	64,84	8,81	213,86	2,14	1972,81
	IH	1662,72	5	30,65	4,32	443,56	4,44	2186,93
	I2PH	1577,85	5	4,38	1,63	100,99	1,01	<b>1733,23</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1577,85	5	4,38	1,63	100,99	1,01	<b>1733,23</b>
6	SCH	1664,33	7	8,55	2,81	203,96	2,04	1946,85
	NNH	1769,85	6	75,45	10,91	300,99	3,01	2206,29
	IH	1767,30	6	73,03	6,99	493,07	4,93	2393,39
	I2PH	1576,91	7	5,46	1,29	146,53	1,47	<b>1798,90</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1576,91	7	5,46	1,29	146,53	1,47	<b>1798,90</b>
7	SCH	1593,86	5	15,43	2,42	336,63	3,37	1995,93
	NNH	1543,46	5	76,29	8,11	292,08	2,92	1961,83
	IH	1619,77	5	83,54	5,50	263,37	2,63	2016,68
	I2PH	1482,99	5	1,41	0,72	31,68	0,32	<b>1566,08</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1482,99	5	1,41	0,72	31,68	0,32	<b>1566,08</b>
8	SCH	1431,31	3	6,08	1,02	74,26	0,74	1541,65
	NNH	1519,64	3	13,30	0,78	112,87	1,13	1675,81
	IH	1414,52	3	32,23	2,51	183,17	1,83	1659,92
	I2PH	1368,02	3	20,59	1,76	56,44	0,56	<b>1475,05</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1368,02	3	20,59	1,76	56,44	0,56	<b>1475,05</b>
9	SCH	1605,38	5	4,96	0,62	310,89	3,11	1971,22
	NNH	1515,63	4	78,04	7,33	270,30	2,70	1903,96
	IH	1491,02	4	41,09	2,30	254,46	2,54	1826,57
	I2PH	1455,47	6	2,63	1,05	62,38	0,62	<b>1580,48</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	1455,47	6	2,63	1,05	62,38	0,62	<b>1580,48</b>

TABLA 9.16: Comparativa de heurísticas en entornos estocásticos y estáticos  
Clase C1 y 100 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC
1	SCH	3907,84	15	7,51	2,19	539,60	5,40	4604,95
	NNH	3996,84	11	135,49	23,68	860,40	8,60	5102,72
	IH	4053,94	13	169,39	13,56	989,11	9,89	5342,44
	I2PH	3772,87	12	2,66	1,62	403,96	4,04	<b>4299,49</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3772,87	12	2,66	1,62	403,96	4,04	<b>4299,49</b>
2	SCH	3879,57	14	13,83	3,43	735,64	7,36	4769,04
	NNH	4173,98	10	82,78	14,99	538,61	5,39	4895,38
	IH	3831,25	12	145,33	12,56	864,36	8,64	4960,93
	I2PH	3565,51	10	9,51	3,63	669,31	6,69	<b>4344,32</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3565,51	10	9,51	3,63	669,31	6,69	<b>4344,32</b>
3	SCH	3917,11	11	24,94	3,87	553,47	5,53	4605,52
	NNH	4204,48	8	100,89	13,54	520,79	5,21	4906,16
	IH	3685,77	9	52,20	5,48	923,76	9,24	4751,73
	I2PH	3313,70	9	14,83	4,17	636,63	6,37	<b>4055,16</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3313,70	9	14,83	4,17	636,63	6,37	<b>4055,16</b>
4	SCH	3758,20	10	16,10	2,39	348,51	3,49	4222,81
	NNH	4082,58	10	77,33	6,76	438,61	4,39	4698,53
	IH	3650,12	7	95,08	7,25	613,86	6,14	4429,07
	I2PH	3262,20	7	19,16	2,62	366,34	3,66	<b>3717,70</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3262,20	7	19,16	2,62	366,34	3,66	<b>3717,70</b>
5	SCH	3955,99	11	7,77	2,22	598,02	5,98	4671,78
	NNH	4023,79	10	129,29	16,16	840,59	8,41	5093,68
	IH	3862,95	12	197,60	12,66	795,05	7,95	4975,61
	I2PH	3771,65	12	11,07	3,46	419,80	4,20	<b>4322,53</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3771,65	12	11,07	3,46	419,80	4,20	<b>4322,53</b>
6	SCH	3791,53	12	8,83	2,17	382,18	3,82	4302,54
	NNH	3990,22	8	138,53	17,82	639,60	6,40	4848,35
	IH	3756,41	10	129,72	11,33	963,37	9,63	4949,49
	I2PH	3447,95	11	13,24	3,56	294,06	2,94	<b>3865,25</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3447,95	11	13,24	3,56	294,06	2,94	<b>3865,25</b>
7	SCH	3941,94	11	12,52	2,87	579,21	5,79	4643,67
	NNH	3933,59	10	116,42	15,48	749,50	7,50	4899,51
	IH	3835,28	10	142,06	12,42	720,79	7,21	4798,13
	I2PH	3590,34	11	8,14	2,08	268,32	2,68	<b>3976,80</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3590,34	11	8,14	2,08	268,32	2,68	<b>3976,80</b>
8	SCH	3302,96	7	13,64	1,56	171,29	1,71	<b>3557,89</b>
	NNH	3603,52	7	95,19	6,43	281,19	2,81	4049,90
	IH	3397,81	6	51,79	4,69	318,81	3,19	3828,41
	I2PH	3218,03	6	26,29	2,35	286,14	2,86	3590,45
	I <sup>2</sup> 2PH	3218,03	6	26,29	2,35	286,14	2,86	3590,45
9	SCH	3717,08	10	4,41	0,88	562,38	5,62	4383,88
	NNH	3655,06	9	175,95	14,46	608,91	6,09	4529,92
	IH	3500,84	10	174,24	11,34	502,97	5,03	4278,05
	I2PH	3437,83	12	13,33	2,40	236,63	2,37	<b>3807,79</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	3437,83	12	13,33	2,40	236,63	2,37	<b>3807,79</b>

TABLA 9.17: Comparativa de heurísticas en entornos estocásticos y estáticos  
Clase RC1 y 25 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC
1	SCH	1431,39	9	2,60	0,78	114,85	1,15	1638,84
	NNH	1470,17	12	16,04	3,29	29,70	0,30	<b>1635,92</b>
	IH	1488,22	8	18,90	3,85	77,23	0,77	1664,35
	I2PH	1461,39	10	0,56	0,45	187,13	1,87	1749,07
	I <sup>2</sup> 2PH	1461,39	10	0,56	0,45	187,13	1,87	1749,07
2	SCH	1177,52	8	1,00	0,44	144,55	1,45	<b>1403,07</b>
	NNH	1264,94	7	13,96	2,69	108,91	1,09	1457,81
	IH	1412,44	7	17,26	2,87	123,76	1,24	1623,46
	I2PH	1177,52	7	2,43	0,81	188,12	1,88	1438,07
	I <sup>2</sup> 2PH	1177,52	7	2,43	0,81	188,12	1,88	1438,07
3	SCH	1153,75	6	0,56	0,24	157,43	1,57	<b>1371,74</b>
	NNH	1268,93	5	8,42	1,53	204,95	2,05	1532,29
	IH	1309,96	6	1,17	0,58	98,02	0,98	1469,15
	I2PH	1152,29	7	0,08	0,05	155,45	1,55	1377,81
	I <sup>2</sup> 2PH	1152,29	7	0,08	0,05	155,45	1,55	1377,81
4	SCH	1072,62	7	0,00	0,00	48,51	0,49	<b>1191,14</b>
	NNH	1138,24	5	3,22	0,88	154,46	1,54	1345,92
	IH	1170,52	6	0,15	0,06	206,93	2,07	1437,61
	I2PH	1072,62	6	0,52	0,18	80,20	0,80	1213,34
	I <sup>2</sup> 2PH	1072,62	6	0,52	0,18	80,20	0,80	1213,34
5	SCH	1344,02	10	0,99	0,47	92,08	0,92	<b>1537,09</b>
	NNH	1423,22	9	10,53	2,91	76,24	0,76	1599,98
	IH	1509,55	8	22,01	4,88	83,17	0,83	1694,74
	I2PH	1345,62	11	0,64	0,35	194,06	1,94	1650,32
	I <sup>2</sup> 2PH	1345,62	11	0,64	0,35	194,06	1,94	1650,32
6	SCH	1344,75	8	2,34	0,63	235,64	2,36	<b>1662,73</b>
	NNH	1494,78	9	6,94	2,26	181,19	1,81	1772,91
	IH	1235,95	7	1,93	0,71	421,78	4,22	1729,66
	I2PH	1344,75	9	0,02	0,01	236,63	2,37	1671,40
	I <sup>2</sup> 2PH	1344,75	9	0,02	0,01	236,63	2,37	1671,40
7	SCH	1214,56	10	3,05	1,25	76,24	0,76	<b>1393,85</b>
	NNH	1337,02	7	16,80	3,71	88,12	0,88	1511,93
	IH	1480,99	7	6,87	1,75	124,75	1,25	1682,61
	I2PH	1214,56	9	1,39	0,74	91,09	0,91	1397,04
	I <sup>2</sup> 2PH	1214,56	9	1,39	0,74	91,09	0,91	1397,04
8	SCH	1159,86	9	0,76	0,32	97,03	0,97	<b>1347,65</b>
	NNH	1481,15	8	7,64	1,46	89,11	0,89	1657,90
	IH	1535,75	7	4,52	1,21	149,50	1,50	1759,78
	I2PH	1159,86	8	0,00	0,00	179,21	1,79	1419,07
	I <sup>2</sup> 2PH	1159,86	8	0,00	0,00	179,21	1,79	1419,07

TABLA 9.18: Comparativa de heurísticas en entornos estocásticos y estáticos  
Clase RC1 y 50 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC
1	SCH	3027,36	21	1,06	0,63	373,27	3,73	3611,68
	NNH	3254,61	25	23,79	6,78	130,69	1,31	3659,09
	IH	3013,80	21	26,97	6,07	357,43	3,57	<b>3608,20</b>
	I2PH	3039,08	22	9,94	2,92	391,09	3,91	3660,11
	I <sup>2</sup> 2PH	3039,08	22	9,94	2,92	391,09	3,91	3660,11
2	SCH	2524,83	16	8,82	2,90	342,57	3,43	<b>3036,22</b>
	NNH	2953,09	19	21,56	6,20	158,42	1,58	3323,06
	IH	2882,21	14	61,88	9,55	320,79	3,21	3404,88
	I2PH	2582,73	17	4,02	1,76	283,17	2,83	3039,92
	I <sup>2</sup> 2PH	2582,73	17	4,02	1,76	283,17	2,83	3039,92
3	SCH	2405,51	14	1,82	0,86	169,31	1,69	<b>2716,64</b>
	NNH	2685,69	13	19,51	4,15	285,15	2,85	3120,35
	IH	2851,66	12	17,36	4,47	312,87	3,13	3301,90
	I2PH	2339,73	13	2,91	1,27	260,40	2,60	2733,04
	I <sup>2</sup> 2PH	2339,73	13	2,91	1,27	260,40	2,60	2733,04
4	SCH	2221,28	11	0,96	0,38	128,71	1,29	<b>2460,95</b>
	NNH	2522,48	10	16,85	3,07	196,04	1,96	2835,37
	IH	2446,84	11	3,71	1,00	244,55	2,45	2805,10
	I2PH	2224,48	10	2,94	0,94	208,91	2,09	2536,33
	I <sup>2</sup> 2PH	2224,48	10	2,94	0,94	208,91	2,09	2536,33
5	SCH	2927,77	19	11,69	3,05	320,79	3,21	3450,25
	NNH	3264,91	19	18,81	6,14	68,32	0,68	3542,04
	IH	3214,80	17	25,13	6,91	454,46	4,54	3864,39
	I2PH	2936,74	17	9,62	3,24	261,39	2,61	<b>3377,75</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	2936,74	17	9,62	3,24	261,39	2,61	<b>3377,75</b>
6	SCH	2852,50	18	10,24	1,98	535,64	5,36	3578,38
	NNH	3373,17	21	15,85	5,32	252,48	2,52	3851,50
	IH	2979,27	17	23,02	4,74	644,55	6,45	3816,84
	I2PH	2867,95	17	0,81	0,44	419,80	4,20	<b>3458,56</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	2867,95	17	0,81	0,44	419,80	4,20	<b>3458,56</b>
7	SCH	2395,24	20	0,65	0,32	313,86	3,14	2909,75
	NNH	3086,29	16	23,71	5,50	225,74	2,26	3495,74
	IH	2766,39	16	22,70	4,42	541,58	5,42	3490,67
	I2PH	2398,90	19	0,02	0,03	248,51	2,49	<b>2837,43</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	2398,90	19	0,02	0,03	248,51	2,49	<b>2837,43</b>
8	SCH	2324,84	18	0,01	0,01	375,25	3,75	2880,10
	NNH	3002,56	15	19,65	3,31	293,07	2,93	3465,29
	IH	2926,24	14	12,69	2,55	495,05	4,95	3573,98
	I2PH	2324,84	18	0,10	0,08	369,31	3,69	<b>2874,25</b>
	I <sup>2</sup> 2PH	2324,84	18	0,10	0,08	369,31	3,69	<b>2874,25</b>

TABLA 9.19: Comparativa de heurísticas en entornos estocásticos y estáticos  
Clase RC1 y 100 Tareas

Test	Heurística	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	TC
1	SCH	4524,20	36	14,67	2,47	826,73	8,27	5725,61
	NNH	4996,83	35	54,23	14,44	562,38	5,62	5963,44
	IH	5076,03	35	97,34	11,74	943,56	9,44	6466,94
	I2PH	4542,85	39	7,34	3,28	914,85	9,15	5855,04
	I <sup>2</sup> 2PH	4542,85	39	7,34	3,28	914,85	9,15	5855,04
2	SCH	4049,96	27	9,33	3,24	482,18	4,82	4811,47
	NNH	4869,03	27	41,84	13,43	633,66	6,34	5814,53
	IH	4746,86	24	48,84	10,05	902,97	9,03	5938,67
	I2PH	4085,49	27	7,23	3,27	581,19	5,81	4943,91
	I <sup>2</sup> 2PH	4085,49	27	7,23	3,27	581,19	5,81	4943,91
3	SCH	3971,08	23	4,94	1,76	335,64	3,36	4541,66
	NNH	4400,07	20	42,38	8,96	525,74	5,26	5168,20
	IH	4657,17	21	24,07	5,56	777,23	7,77	5668,47
	I2PH	3773,58	23	5,14	2,38	467,33	4,67	4476,04
	I <sup>2</sup> 2PH	3773,58	23	5,14	2,38	467,33	4,67	4476,04
4	SCH	3786,31	19	4,01	1,60	513,86	5,14	4494,17
	NNH	4446,34	19	48,42	8,78	331,68	3,32	5016,44
	IH	4124,16	19	35,04	3,89	405,94	4,06	4755,14
	I2PH	3786,61	19	9,87	2,88	471,29	4,71	4457,77
	I <sup>2</sup> 2PH	3786,61	19	9,87	2,88	471,29	4,71	4457,77
5	SCH	4624,89	33	14,54	3,89	624,75	6,25	5594,19
	NNH	5295,82	31	59,41	15,22	536,63	5,37	6201,86
	IH	5230,93	30	76,58	12,28	882,18	8,82	6489,69
	I2PH	4646,74	33	2,29	1,47	596,04	5,96	5575,07
	I <sup>2</sup> 2PH	4646,74	33	2,29	1,47	596,04	5,96	5575,07
6	SCH	4289,88	31	7,71	2,55	951,49	9,51	5559,07
	NNH	5137,72	30	40,55	13,04	722,77	7,23	6201,05
	IH	4796,07	29	57,07	11,25	1018,81	10,19	6161,95
	I2PH	4289,88	31	4,13	1,75	979,21	9,79	5583,21
	I <sup>2</sup> 2PH	4289,88	31	4,13	1,75	979,21	9,79	5583,21
7	SCH	3946,73	31	5,92	1,41	739,60	7,40	5002,25
	NNH	4851,54	26	48,89	12,93	535,64	5,36	5696,07
	IH	4861,72	25	43,23	8,50	1020,79	10,21	6175,74
	I2PH	3918,02	31	3,85	1,77	531,68	5,32	4763,56
	I <sup>2</sup> 2PH	3918,02	31	3,85	1,77	531,68	5,32	4763,56
8	SCH	3814,27	30	2,37	0,86	731,68	7,32	4848,33
	NNH	4831,99	25	24,38	5,17	772,28	7,72	5878,65
	IH	4887,08	25	27,63	4,88	824,75	8,25	5989,46
	I2PH	3784,80	29	7,90	3,09	817,82	8,18	4900,52
	I <sup>2</sup> 2PH	3784,80	29	7,90	3,09	817,82	8,18	4900,52

TABLA 9.20: Heurísticas en entornos estocásticos y estáticos - Costes medios por tarea

Clase	Heurística	Número de tareas			
		25	50	100	Media
R1	SCH	529,97	513,19	470,47	504,54
	NNH	585,10	585,59	529,77	566,82
	IH	603,32	603,63	551,01	585,99
	I2PH	526,45	508,94	473,48	502,96
	I <sup>2</sup> 2PH	526,45	508,94	473,35	502,91
C1	SCH	333,32	343,07	397,62	358,00
	NNH	336,79	353,48	430,24	373,51
	IH	316,09	359,62	423,14	366,28
	I2PH	279,30	296,87	359,79	311,99
	I <sup>2</sup> 2PH	279,30	296,87	359,79	311,99
RC1	SCH	461,84	492,88	405,77	453,50
	NNH	500,59	545,85	459,40	501,95
	IH	522,45	557,32	476,46	518,74
	I2PH	476,64	490,35	405,55	457,51
	I <sup>2</sup> 2PH	476,64	490,35	405,55	457,51
Media	SCH	441,71	449,71	424,62	438,68
	NNH	474,16	494,97	473,14	480,76
	IH	480,62	506,85	483,54	490,34
	I2PH	427,46	432,05	412,94	424,15
	I <sup>2</sup> 2PH	427,46	432,05	412,90	424,14

### 9.3. Comparativa entre entornos deterministas y estocásticos

El empeoramiento de cada uno de los casos cuando se sitúan en entornos estocásticos puede verse en la Tabla 9.21. Dicha tabla, aunque no arroja demasiada luz para cuantificar cómo afecta la incertidumbre a la aptitud de una solución al problema, permite extraer algunas conclusiones:

- Las soluciones pueden desviarse mucho del coste esperado si la incertidumbre no es considerada, en los ejemplos hasta un 30 % de la media.
- No considerar la incertidumbre no implica necesariamente que la solución vaya a ser inadecuada, sin embargo el riesgo aumenta.
- Que las soluciones que más empeoran suelen ser las que tienen una programación más ajustada a los límites superiores de las ventanas temporales.

Si se observa la Tabla 9.22, que compara los costes medios por tarea proporcionados en la Tablas 9.10 (entorno determinista) con los costes medios proporcionados por la Tabla 9.20 (entorno estocástico), se puede deducir que la influencia media de la incertidumbre supone alrededor del 10-15 % de los costes<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>en las condiciones del experimento

TABLA 9.21: Comparativa entre entornos deterministas y estocásticos  
empeoramiento en tanto por ciento

Test	Heurística	R1			C1			RC1		
		25	50	100	25	50	100	25	50	100
1	SCH	22,05	15,57	14,76	28,83	21,05	13,39	7,63	11,56	16,97
	NNH	24,46	14,67	17,45	26,16	18,47	22,00	2,13	3,94	10,82
	IH	14,15	15,48	15,71	7,03	16,67	23,67	5,22	11,36	17,61
	I2PH	20,09	15,77	12,22	9,94	9,44	10,45	12,02	12,31	18,69
	I <sup>2</sup> 2PH	20,09	15,77	12,43	9,94	9,44	10,45	12,02	12,31	18,69
2	SCH	8,22	8,89	14,04	17,72	17,61	18,65	11,57	12,94	11,29
	NNH	9,22	8,83	11,82	18,61	19,82	13,49	8,33	5,29	13,00
	IH	13,75	8,00	10,52	8,55	18,97	21,83	8,66	10,95	18,33
	I2PH	5,67	7,63	15,09	17,10	16,00	18,52	15,27	10,43	13,51
	I <sup>2</sup> 2PH	5,67	7,63	15,09	17,10	16,00	18,52	15,27	10,43	13,51
3	SCH	4,96	8,87	12,97	9,57	4,41	14,21	13,02	6,72	8,11
	NNH	26,48	14,35	10,64	14,48	7,99	13,20	15,70	10,57	12,16
	IH	23,96	21,23	14,66	8,75	17,24	24,82	7,24	10,78	16,17
	I2PH	13,05	8,66	17,87	0,01	11,46	19,14	12,72	10,66	11,80
	I <sup>2</sup> 2PH	13,05	8,66	17,87	0,01	11,46	19,14	12,72	10,66	11,80
4	SCH	3,15	9,25	8,63	13,57	11,60	9,45	4,25	5,56	13,02
	NNH	14,53	8,36	12,56	11,01	6,86	11,68	13,27	8,03	7,96
	IH	10,19	10,85	15,77	8,25	16,43	17,12	16,83	9,71	9,52
	I2PH	5,42	9,22	5,71	0,00	4,21	11,57	7,13	9,11	12,10
	I <sup>2</sup> 2PH	5,42	9,22	5,71	0,00	4,21	11,57	7,13	9,11	12,10
5	SCH	19,36	17,32	23,34	17,47	21,18	14,90	6,45	10,42	12,72
	NNH	6,12	16,87	13,20	12,89	15,14	22,23	5,55	2,40	10,04
	IH	11,08	15,93	15,67	24,73	26,78	19,61	5,38	13,68	16,23
	I2PH	17,48	13,23	17,68	8,65	6,47	11,07	13,38	8,72	12,02
	I <sup>2</sup> 2PH	17,48	13,23	17,68	8,65	6,47	11,07	13,38	8,72	12,02
6	SCH	7,79	12,51	10,08	9,06	11,98	10,00	16,70	17,77	20,85
	NNH	17,67	15,99	14,82	8,44	18,23	17,60	11,61	7,44	13,93
	IH	14,52	12,18	11,12	19,48	27,70	25,43	30,45	20,72	20,36
	I2PH	13,08	10,17	12,23	10,66	9,23	8,64	16,49	13,85	21,38
	I <sup>2</sup> 2PH	13,08	10,17	12,23	10,66	9,23	8,64	16,49	13,85	21,38
7	SCH	7,49	10,42	10,67	18,22	21,42	14,60	5,92	12,12	17,44
	NNH	12,93	21,30	15,80	17,06	20,73	20,43	6,93	7,32	11,18
	IH	18,28	14,24	13,24	17,27	15,48	18,89	8,37	18,71	15,71
	I2PH	11,97	11,27	19,45	0,25	2,16	7,47	7,09	9,60	12,67
	I <sup>2</sup> 2PH	11,97	11,27	19,45	0,25	2,16	7,47	7,09	9,60	12,67
8	SCH	6,81	9,81	6,09	2,53	5,50	5,48	7,82	14,98	17,84
	NNH	4,88	11,04	11,57	8,73	8,14	9,51	6,18	9,64	15,46
	IH	4,83	13,62	11,95	3,86	13,99	10,12	9,59	15,96	16,33
	I2PH	11,49	11,36	11,50	1,97	5,51	9,53	14,45	14,75	20,26
	I <sup>2</sup> 2PH	11,49	11,36	11,50	1,97	5,51	9,53	14,45	14,75	20,26
9	SCH	14,62	18,57	22,21	13,71	19,08	14,85			
	NNH	8,80	18,31	11,35	18,23	21,18	18,82			
	IH	18,90	25,02	19,49	17,64	16,45	13,68			
	I2PH	19,62	20,57	20,25	0,01	4,29	7,03			
	I <sup>2</sup> 2PH	19,62	20,57	20,25	0,01	4,29	7,03			
10	SCH	11,78	19,02	21,90						
	NNH	15,10	10,35	12,03						
	IH	20,12	16,99	20,37						
	I2PH	13,42	14,35	28,02						
	I <sup>2</sup> 2PH	13,42	14,35	28,02						
11	SCH	16,02	11,04	16,03						
	NNH	7,22	12,45	16,98						
	IH	17,92	17,09	16,43						
	I2PH	19,02	15,49	26,52						
	I <sup>2</sup> 2PH	19,02	15,49	26,52						
12	SCH	9,89	13,60	17,84						
	NNH	8,20	9,72	13,13						
	IH	12,72	18,14	17,20						
	I2PH	4,65	17,28	22,68						
	I <sup>2</sup> 2PH	4,65	17,28	22,68						

TABLA 9.22: Comparativa entre entornos deterministas y estocásticos  
Incremento de costes medios por tarea

Clase	Heurística	Número de tareas			
		25	50	100	Media
R1	SCH	11,19 %	12,97 %	14,95 %	12,94 %
	NNH	12,87 %	13,59 %	13,47 %	13,30 %
	IH	15,07 %	15,70 %	15,14 %	15,31 %
	I2PH	13,04 %	12,94 %	17,37 %	14,33 %
	I <sup>2</sup> 2PH	13,04 %	12,94 %	17,39 %	14,34 %
C1	SCH	14,73 %	14,98 %	12,99 %	14,16 %
	NNH	15,12 %	15,06 %	16,58 %	15,66 %
	IH	13,06 %	19,08 %	19,66 %	17,50 %
	I2PH	5,68 %	7,66 %	11,46 %	8,47 %
	I <sup>2</sup> 2PH	5,68 %	7,66 %	11,46 %	8,47 %
RC1	SCH	9,22 %	11,68 %	14,84 %	11,75 %
	NNH	8,45 %	6,67 %	11,85 %	8,80 %
	IH	10,98 %	14,07 %	16,42 %	13,71 %
	I2PH	12,43 %	11,22 %	15,38 %	12,84 %
	I <sup>2</sup> 2PH	12,43 %	11,22 %	15,38 %	12,84 %
Media	SCH	11,36 %	13,00 %	14,30 %	12,85 %
	NNH	11,78 %	11,28 %	13,86 %	12,28 %
	IH	13,12 %	15,87 %	16,85 %	15,27 %
	I2PH	11,13 %	11,04 %	14,95 %	12,31 %
	I <sup>2</sup> 2PH	11,13 %	11,04 %	14,96 %	12,31 %

## 9.4. Comparativa de las heurísticas en entornos estocásticos y con reoptimización

Los epígrafes anteriores han puesto de manifiesto que la incertidumbre en los tiempos de tránsito puede provocar graves desajustes en los costes estimados de una ruta. Por tanto, se pone de manifiesto la posibilidad, e incluso la necesidad, de incorporar mecanismos que reduzcan tal efecto. Este trabajo ha optado por incorporar información en tiempo real relativa a la posición de los vehículos, pudiendo ejecutarse reoptimizaciones en determinados momentos.

Las heurísticas que mejores resultados han dado anteriormente, I2PH y I<sup>2</sup>2PH, van a ser testeadas en este entorno donde, además de existir incertidumbre en los tiempos de tránsito, existe la posibilidad de realizar reoptimizaciones para corregir dichos desajustes. Primero se compararán ambas heurísticas, para determinar cuál presenta mejores prestaciones; luego la heurística que mejores prestaciones presente será parametrizada para posteriormente ser testada en la batería de problemas. Los diferentes eventos de reoptimización serán comparados.

### 9.4.1. Comparación entre I2PH y I<sup>2</sup>2PH

Las Tablas 9.23 y 9.24 presentan la comparación de las heurísticas seleccionadas: la primera representa los costes totales de ambas heurísticas en todos los entornos



estudiados y la segunda muestra la mejora respecto a no usar reoptimizaciones. Todos los tests fueron realizados para problemas de 25 tareas, y considerando como *evento de reoptimización* la finalización de una tarea.

Los resultados ponen de manifiesto varias cuestiones. Lo primero, que la reoptimización disminuye la incertidumbre y por tanto provoca de media una mejora de los resultados en entornos estocásticos. Lo segundo, que cuando no existe incertidumbre, la reoptimización no produce perjuicios, premisa bajo la que se ha desarrollado este trabajo. Y tercero, que las modificaciones aportadas a la heurística I<sup>2</sup>PH han obtenido mejores rendimientos que la heurística I2PH.

Esta última consideración, que era de esperar, es debido a que I<sup>2</sup>PH nace de I2PH con una serie de modificaciones destinadas a impedir una serie de circunstancias que podían dejar sin atender a tiempo determinadas tareas (llamadas *tareas prioritarias*). Este hecho puede ser observado en varios tests de la Tabla 9.24, donde la reoptimización puede empeorar los resultados. La reoptimización mejora la media de los resultados, pero si no está bien diseñada puede provocar que determinados casos particulares se vean perjudicados.

TABLA 9.23: Comparativa de heurísticas en entornos dinámicos - Costes Totales

Clase	Instancia	Entorno Determinista			Entorno Estocástico		
		No ReOpt	ReOpt		No ReOpt	ReOpt	
		I2PH	I2PH	I <sup>2</sup> PH	I2PH	I2PH	I <sup>2</sup> PH
R1	1	1084,40	1084,40	1084,40	1302,36	1308,63	1285,33
	2	1031,44	1031,44	1031,44	1089,96	1070,28	1072,29
	3	891,66	881,66	881,66	996,72	1003,25	911,59
	4	860,31	860,31	860,31	906,93	892,86	862,21
	5	1054,28	1054,28	1054,28	1238,57	1170,81	1171,91
	6	1010,58	1010,58	1010,58	1142,78	1104,65	1093,99
	7	995,33	995,33	995,33	1114,50	1041,43	1016,09
	8	958,25	958,25	958,25	1068,37	1054,58	986,82
	9	945,21	945,21	945,21	1130,64	1127,93	1066,65
	10	907,67	909,51	907,67	1029,45	970,22	946,85
	11	962,54	962,54	962,54	1145,63	1050,80	1005,11
	12	951,15	963,91	951,15	995,40	1006,81	974,01
C1	1	837,13	836,64	837,13	920,35	906,97	901,60
	2	708,13	708,13	708,13	829,24	812,31	782,27
	3	673,46	673,46	673,46	673,50	689,58	673,46
	4	675,82	675,82	675,82	675,82	675,82	675,82
	5	767,16	767,16	767,16	833,50	816,94	779,85
	6	839,91	839,91	839,91	929,41	918,87	918,45
	7	758,59	758,59	758,59	760,51	760,51	760,02
	8	652,36	652,36	652,36	665,23	657,34	662,36
	9	694,89	694,89	694,89	694,96	685,73	694,89
RC1	1	1561,39	1561,39	1561,39	1749,07	1763,57	1693,64
	2	1247,52	1247,52	1247,52	1438,07	1406,93	1340,85
	3	1222,29	1212,29	1212,29	1377,81	1314,87	1289,44
	4	1132,62	1122,62	1122,62	1213,34	1202,04	1146,91
	5	1455,62	1455,62	1445,62	1650,32	1647,59	1608,70
	6	1434,75	1434,75	1434,75	1671,40	1695,73	1619,20
	7	1304,56	1304,56	1304,56	1397,04	1385,08	1370,81
	8	1239,86	1239,86	1239,86	1419,07	1358,42	1341,36

TABLA 9.24: Comparativa de heurísticas en entornos dinámicos - Mejoras

Clase	Instancia	Entorno Determinista		Entorno Estocástico	
		I2PH	I <sup>2</sup> 2PH	I2PH	I <sup>2</sup> 2PH
R1	1	0,00 %	0,00 %	-0,48 %	1,31 %
	2	0,00 %	0,00 %	1,81 %	1,62 %
	3	1,12 %	1,12 %	-0,65 %	8,54 %
	4	0,00 %	0,00 %	1,55 %	4,93 %
	5	0,00 %	0,00 %	5,47 %	5,38 %
	6	0,00 %	0,00 %	3,34 %	4,27 %
	7	0,00 %	0,00 %	6,56 %	8,83 %
	8	0,00 %	0,00 %	1,29 %	7,63 %
	9	0,00 %	0,00 %	0,24 %	5,66 %
	10	-0,20 %	0,00 %	5,75 %	8,02 %
	11	0,00 %	0,00 %	8,28 %	12,27 %
	12	-1,34 %	0,00 %	-1,15 %	2,15 %
	Media	-0,04 %	0,09 %	2,67 %	5,88 %
C1	1	0,06 %	0,00 %	1,45 %	2,04 %
	2	0,00 %	0,00 %	2,04 %	5,66 %
	3	0,00 %	0,00 %	-2,39 %	0,01 %
	4	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
	5	0,00 %	0,00 %	1,99 %	6,44 %
	6	0,00 %	0,00 %	1,13 %	1,18 %
	7	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,06 %
	8	0,00 %	0,00 %	1,19 %	0,43 %
	9	0,00 %	0,00 %	1,33 %	0,01 %
	Media	0,01 %	0,00 %	0,75 %	1,76 %
RC1	1	0,00 %	0,00 %	-0,83 %	3,17 %
	2	0,00 %	0,00 %	2,17 %	6,76 %
	3	0,82 %	0,82 %	4,57 %	6,41 %
	4	0,88 %	0,88 %	0,93 %	5,47 %
	5	0,00 %	0,69 %	0,17 %	2,52 %
	6	0,00 %	0,00 %	-1,46 %	3,12 %
	7	0,00 %	0,00 %	0,86 %	1,88 %
	8	0,00 %	0,00 %	4,27 %	5,48 %
	Media	0,21 %	0,30 %	1,33 %	4,35 %
Todas	Media	0,05 %	0,12 %	1,70 %	4,18 %

Una vez seleccionada la heurística I<sup>2</sup>2PH como la más adecuada para su inclusión en entornos dinámicos, hay que señalar que tal heurística disponía de unos parámetros denominados en conjunto como *factor de mejora*, definidos en el Capítulo 7. Este elemento iba encaminado a mejorar la valoración de las asignaciones que ya estaban en curso para evitar constantes cambios en las mismas. Diferentes tests han sido realizados de manera que pueda elegirse un valor del mismo que dé una solución de compromiso entre no realizar nunca cambios del destino y realizar cambios ante cualquier posible mejora.

Un resumen de los tests realizados se muestra en las Tablas 9.25, 9.26 y 9.27; para encontrar los parámetros adecuados se ha llevado a cabo una exploración cada vez más precisa. La tablas definen el valor de las dos componentes del *factor de mejora* que se aplica, y muestra con un **0** en negrilla el test que obtiene mejor resultado; el resto de datos detalla el aumento porcentual en costes sobre ese mejor resultado.

En vista a los resultados se consideró apropiado tomar como valores para las componentes del *factor de mejora* de 1,05 en el caso de  $IF_1$  y de 4 en el caso de  $IF_2$ . La explicación del significado de dichos parámetros puede verse en el Algoritmo 10 del Capítulo 7.

TABLA 9.25: Factor de mejora - Experimento 1

$IF_2$	$IF_1$										
	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
0	0,70	0,50	<b>0</b>	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
4	<b>0</b>	0,13	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
8	0,13	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,87	1,18
12	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,87	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
16	0,28	0,87	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
20	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18

TABLA 9.26: Factor de mejora - Experimento 2

$IF_2$	$IF_1$										
	1	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,1
0	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,50
4	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0,13
8	0,13	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
12	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
16	0,28	0,28	0,28	0,28	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
20	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18

TABLA 9.27: Factor de mejora - Experimento 3

$IF_1$	$IF_2$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
1,05	0,70	0,70	0,70	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	0,70	0,70	0,70	

#### 9.4.2. Resultados ante reoptimizaciones al finalizar las tareas

Seleccionada la heurística y parametrizada, se van a mostrar detalladamente los tests realizados sobre toda la batería para el *evento de reoptimización* más sencillo; es decir, reoptimizar cuando un vehículo finalice una tarea.

La Tabla 9.28 muestra los resultados para 25 tareas, la Tabla 9.29 los muestra para 50 tareas, y la Tabla 9.30 muestra los resultados para 100 tareas. Se puede observar como a medida que aumenta el número de tareas del problema el tiempo de computación crece exponencialmente.

La comparación de estos resultados con un procedimiento sin reoptimización se hará en las Tablas 9.33, 9.34 y 9.35, donde se muestra la mejora debido a la reoptimización para todos los eventos de reoptimización estudiados.

TABLA 9.28: Heurísticas I<sup>2</sup>2PH en entornos estocásticos y dinámicos - 25 Tareas - Reoptimización al finalizar una tarea

Clase	Instancia	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	CT	Time
R1	1	1011,52	11,19	0,00	0,00	161,90	1,62	1285,33	0,63
	2	961,34	7,46	0,00	0,00	36,35	0,36	1072,29	0,66
	3	821,53	6,62	0,06	0,14	23,81	0,24	911,59	0,61
	4	810,31	5,19	0,00	0,00	0,00	0,00	862,21	0,59
	5	972,86	8,95	0,00	0,00	109,52	1,10	1171,91	0,61
	6	943,99	7,86	0,00	0,00	71,43	0,71	1093,99	0,63
	7	927,04	7,48	0,00	0,00	14,29	0,14	1016,09	0,56
	8	898,25	6,00	0,00	0,00	28,57	0,29	986,82	0,64
	9	900,94	7,05	0,00	0,00	95,24	0,95	1066,65	0,64
	10	841,14	7,24	0,00	0,00	33,33	0,33	946,85	0,60
	11	892,25	7,48	0,00	0,00	38,10	0,38	1005,11	0,61
	12	891,15	6,38	0,01	0,05	19,05	0,19	974,01	0,64
C1	1	799,69	3,05	0,00	0,05	71,43	0,71	901,60	0,69
	2	670,72	4,00	0,12	0,14	71,43	0,71	782,27	0,62
	3	643,46	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	673,46	0,62
	4	655,82	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	675,82	0,62
	5	740,80	2,95	0,00	0,00	9,52	0,10	779,85	0,66
	6	789,41	3,86	0,00	0,00	90,48	0,90	918,45	0,67
	7	728,59	3,14	0,00	0,00	0,00	0,00	760,02	0,64
	8	632,36	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	662,36	0,61
	9	654,89	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	694,89	0,63
RC1	1	1472,59	10,67	0,10	0,14	114,29	1,14	1693,64	0,75
	2	1177,52	7,76	0,00	0,00	85,71	0,86	1340,85	0,61
	3	1166,11	7,10	0,00	0,00	52,38	0,52	1289,44	0,60
	4	1072,62	5,52	0,00	0,00	19,05	0,19	1146,91	0,59
	5	1357,75	10,33	0,00	0,00	147,62	1,48	1608,70	0,71
	6	1357,29	10,00	0,00	0,00	161,90	1,62	1619,20	0,68
	7	1219,85	9,86	0,01	0,05	52,38	0,52	1370,81	0,66
	8	1169,94	8,57	0,00	0,00	85,71	0,86	1341,36	0,62

TABLA 9.29: Heurísticas I<sup>2</sup>2PH en entornos estocásticos y dinámicos - 50 Tareas - Reoptimización al finalizar una tarea

Clase	Instancia	Distancia	Vehículos	cLO	nLO	cLD	nLD	CT	Time
R1	1	1926,03	22,14	0,02	0,05	280,95	2,81	2428,43	2,09
	2	1827,92	14,38	0,00	0,00	104,76	1,05	2076,49	2,18
	3	1667,98	14,76	0,00	0,10	85,71	0,86	1901,31	2,19
	4	1641,63	10,00	0,00	0,00	23,81	0,24	1765,43	1,94
	5	1894,36	17,24	0,00	0,00	223,81	2,24	2290,55	2,26
	6	1771,66	14,29	0,03	0,05	104,76	1,05	2019,31	2,26
	7	1718,71	11,67	0,00	0,00	33,33	0,33	1868,71	2,01
	8	1638,28	9,67	0,00	0,00	19,05	0,19	1753,99	1,88
	9	1771,32	15,14	0,00	0,00	209,52	2,10	2132,27	1,78
	10	1714,01	13,14	0,00	0,00	138,10	1,38	1983,53	2,17
	11	1762,08	14,00	0,00	0,00	109,52	1,10	2011,61	2,07
	12	1676,66	13,19	0,00	0,00	176,19	1,76	1984,76	2,16
C1	1	1553,44	6,24	0,00	0,05	119,05	1,19	1734,87	2,33
	2	1476,09	5,67	0,31	0,29	133,33	1,33	1666,39	2,03
	3	1403,08	5,33	0,00	0,05	76,19	0,76	1532,61	2,08
	4	1433,97	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1473,97	2,20
	5	1565,54	6,00	0,03	0,10	28,57	0,29	1654,15	2,11
	6	1573,11	7,29	0,00	0,00	90,48	0,90	1736,44	2,07
	7	1482,99	5,10	0,02	0,05	0,00	0,00	1533,96	2,07
	8	1368,02	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1408,02	2,20
	9	1455,47	6,05	0,00	0,00	0,00	0,00	1515,95	2,05
RC1	1	3048,34	22,48	0,51	0,33	309,52	3,10	3583,14	2,22
	2	2614,07	18,57	0,01	0,05	138,10	1,38	2937,89	2,02
	3	2370,27	13,14	0,04	0,10	95,24	0,95	2596,98	1,88
	4	2224,48	11,43	0,00	0,00	9,52	0,10	2348,29	1,79
	5	2947,99	19,00	0,00	0,10	171,43	1,71	3309,41	2,23
	6	2878,66	18,90	0,00	0,00	280,95	2,81	3348,66	2,07
	7	2398,90	19,71	0,00	0,00	76,19	0,76	2672,23	1,79
	8	2335,35	19,43	0,00	0,00	185,71	1,86	2715,35	1,79

TABLA 9.30: Heurísticas I<sup>2</sup>PH en entornos estocásticos y dinámicos - 100 Tareas -  
Reoptimización al finalizar una tarea

Clase	Instancia	Distancia	Vehículos	cLO	nLO	cLD	nLD	CT	Time
R1	1	3622,14	42,10	0,00	0,00	442,86	4,43	4485,95	12,69
	2	3355,46	26,05	0,00	0,00	309,52	3,10	3925,46	12,25
	3	3052,51	22,33	0,00	0,00	142,86	1,43	3418,70	11,90
	4	2946,36	19,10	0,00	0,00	52,38	0,52	3189,69	12,37
	5	3358,60	30,57	0,00	0,00	290,48	2,90	3954,79	12,45
	6	3221,28	23,43	0,00	0,00	152,38	1,52	3607,95	11,69
	7	3014,04	20,24	0,00	0,00	85,71	0,86	3302,14	11,65
	8	2924,06	18,43	0,00	0,00	14,29	0,14	3122,64	11,83
	9	3161,85	26,00	0,00	0,00	300,00	3,00	3721,85	11,89
	10	3022,11	26,81	0,00	0,00	257,14	2,57	3547,34	11,85
	11	3186,67	24,81	0,00	0,00	323,81	3,24	3758,58	12,24
	12	2971,63	25,86	0,00	0,00	276,19	2,76	3506,39	11,80
C1	1	3772,97	12,38	0,02	0,14	214,29	2,14	4111,08	12,88
	2	3599,05	11,71	0,00	0,05	257,14	2,57	3973,34	13,46
	3	3314,78	9,86	0,00	0,00	80,95	0,81	3494,30	13,48
	4	3262,52	7,57	0,00	0,00	19,05	0,19	3357,28	14,44
	5	3718,84	11,86	0,12	0,19	90,48	0,90	3928,00	13,40
	6	3455,24	11,00	0,00	0,00	109,52	1,10	3674,77	13,49
	7	3592,59	12,38	0,00	0,00	76,19	0,76	3792,59	13,33
	8	3218,03	8,48	0,00	0,00	0,00	0,00	3302,79	14,54
	9	3411,83	12,81	0,00	0,00	47,62	0,48	3587,54	13,68
RC1	1	4632,20	41,00	0,00	0,00	652,38	6,52	5694,58	12,34
	2	4148,67	29,48	0,00	0,00	295,24	2,95	4738,67	12,04
	3	3802,37	22,19	0,00	0,00	123,81	1,24	4148,08	12,09
	4	3795,91	19,33	0,00	0,00	61,90	0,62	4051,15	12,85
	5	4677,20	34,90	0,00	0,00	438,10	4,38	5464,34	13,03
	6	4370,20	33,76	0,00	0,00	400,00	4,00	5107,82	12,04
	7	3956,49	33,67	0,00	0,00	242,86	2,43	4536,01	11,57
	8	3873,41	31,90	0,00	0,00	380,95	3,81	4573,41	11,70

### 9.4.3. Comparativa ante diferentes eventos de reoptimización

En el Capítulo 6 se definieron varios *eventos de reoptimización*: el primero era reoptimizar al finalizar las tareas, lo cual se ha sido el procedimiento seguido hasta ahora; el segundo, reoptimizar cada cierto tiempo; y el tercero, reoptimizar cuando el vehículo se desvía de la posición esperada.

Este epígrafe va a intentar comparar los tres métodos. Las dos reoptimizaciones últimas se han planteado como complementos a la reoptimización al finalizar las tareas. Este planteamiento se sustenta en el hecho de que la reoptimización no puede perder la oportunidad de cambiar la asignación de tareas sin necesidad de que el vehículo se vea afectado en mitad de la ruta; por tanto no se ha considerado oportuno dejar de usar la reoptimización en el momento que una tarea es finalizada.

En el caso de reoptimizaciones cada cierto intervalo de tiempo, una importante cuestión sería determinar dicho intervalo temporal. Se diseñó para tal fin un experimento que, sobre un mismo problema (Instancia R1.1 para 25 tareas), iba variando dicho intervalo de reoptimización, ReOptTime. De este modo se pretendía ver cómo se comportaba la solución y cuánto tiempo de ejecución en la CPU consumía, mostrado en segundos en la columna Time. La Tabla 9.31 y la Figura 9.1 muestran los resultados del experimento.

TABLA 9.31: Análisis del intervalo de optimización (25 Tareas - Test R1.1)

ReOptTime	Distancia	nV	cLO	nLO	cLD	nLD	CT	Time
1	1011,80	11,29	0,00	0,00	131,33	1,31	1267,67	11,08
2	1012,94	11,29	0,00	0,00	129,13	1,29	1264,19	5,85
3	1011,68	11,24	0,00	0,00	132,86	1,33	1267,23	4,08
4	1012,93	11,19	0,00	0,00	132,86	1,33	1268,08	3,22
5	1013,44	11,24	0,00	0,00	133,33	1,33	1259,70	2,70
10	1012,57	11,24	0,00	0,00	133,33	1,33	1259,32	1,66
15	1011,59	11,19	0,00	0,00	142,86	1,43	1267,69	1,30
20	1011,51	11,19	0,00	0,00	147,33	1,47	1258,66	1,13
25	1012,20	11,19	0,00	0,00	157,14	1,57	1283,67	1,02
30	1011,40	11,19	0,00	0,00	152,86	1,53	1268,83	0,96
45	1011,40	11,19	0,00	0,00	161,90	1,62	1287,59	0,84
60	1011,40	11,19	0,00	0,00	152,86	1,53	1269,16	0,78
Fin Tarea	1011,52	11,19	0,00	0,00	161,90	1,62	1285,33	0,63

Los resultados muestran cómo por norma al disminuir el intervalo de reoptimización aumenta la calidad de la solución (Ver Figura 9.1(a)), aunque aumenta el tiempo de computación consumido (Ver Figura 9.1(b)). A la vista de los resultados, un intervalo de reoptimización de unos 10 minutos se ha considerado el más apropiado, dado que aumenta la calidad de la solución sin aumentar excesivamente el tiempo de computación.

La Tablas 9.33, 9.34 y 9.35 muestran una comparativa de los tres tipos de

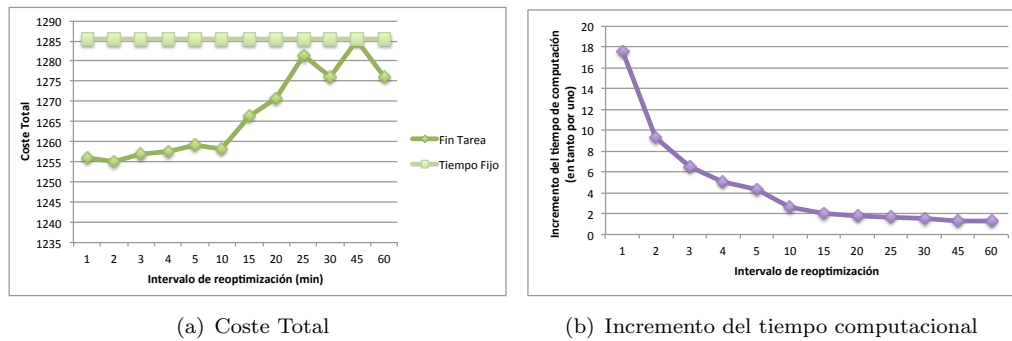


FIGURA 9.1: Análisis del intervalo de optimización para 25 clientes (Test R1.1)

reoptimización para diferentes tamaños de problemas. En la misma se muestran tanto los costes totales como el porcentaje de mejora respecto al caso de no aplicar reoptimización. Por facilitar la notación de las tablas se han añadido una serie de abreviaturas: NoReOpt significa que no existe reoptimización, FinT significa que existe reoptimización al finalizar una tarea, FixT significa que se han añadido reoptimizaciones cuando pasa un cierto tiempo fijo, y por último DEP significa que se han añadido reoptimizaciones cuando existe desviación de los vehículos sobre la posición esperada.

Las tablas muestran varios detalles a destacar. El primero que, por norma general, añadir nuevos eventos de reoptimizaciones mejora la calidad de las soluciones; de media la opción de reoptimizar cada cierto tiempo y cuando termina una tarea es la que mejores prestaciones presenta. Cuando se habla de casos particulares el comportamiento no es siempre así; reoptimizar más veces no tiene necesariamente que implicar mayor mejora. Este hecho es lógico; dado que las reoptimizaciones cambian asignaciones de tareas a vehículos ante circunstancias adversas, los vehículos cambian sus rutas; sin embargo estos cambios no garantizan que el tráfico vaya a ser fluido en la nueva ruta.

Otra consideración a tener en cuenta es el tiempo de computación que ocupa cada una de las alternativas mostradas; los tiempos para todos los tipos de reoptimizaciones por número de tareas se presentan en la Tabla 9.32.

TABLA 9.32: Comparación de eventos de reoptimización - Tiempo computacional

Evento	Número de tareas		
	25	50	100
FinT	0,63	2,05	12,97
FixT	1,27	3,82	21,24
DET	2,12	6,92	35,15



TABLA 9.33: Comparación de eventos de reoptimización - 25 Tareas

Clase	Test	TC				Mejora		
		NoReOpt	FinT	FixT	DEP	FinT	FixT	DEP
R1	1	1302,36	1285,33	1234,89	1246,37	1,31 %	5,18 %	4,30 %
	2	1089,96	1072,29	1072,29	1072,29	1,62 %	1,62 %	1,62 %
	3	996,72	911,59	886,86	899,97	8,54 %	11,02 %	9,71 %
	4	906,93	862,21	862,09	862,10	4,93 %	4,94 %	4,94 %
	5	1238,57	1171,91	1167,16	1168,85	5,38 %	5,77 %	5,63 %
	6	1142,78	1093,99	1127,60	1109,36	4,27 %	1,33 %	2,92 %
	7	1114,50	1016,09	996,79	1006,96	8,83 %	10,56 %	9,65 %
	8	1068,37	986,82	975,55	979,25	7,63 %	8,69 %	8,34 %
	9	1130,64	1066,65	1043,74	1052,47	5,66 %	7,69 %	6,91 %
	10	1029,45	946,85	950,72	946,85	8,02 %	7,65 %	8,02 %
	11	1145,63	1005,11	1039,41	1037,21	12,27 %	9,27 %	9,46 %
	12	995,40	974,01	963,90	967,43	2,15 %	3,16 %	2,81 %
	Media					5,88 %	6,41 %	6,19 %
C1	1	920,35	901,60	888,19	874,93	2,04 %	3,49 %	4,94 %
	2	829,24	782,27	790,22	813,78	5,66 %	5,66 %	1,86 %
	3	673,50	673,46	673,50	673,50	0,01 %	0,01 %	0,00 %
	4	675,82	675,82	675,79	675,79	0,00 %	0,00 %	0,00 %
	5	833,50	779,85	766,17	775,56	6,44 %	6,44 %	6,95 %
	6	929,41	918,45	920,42	912,09	1,18 %	1,18 %	1,86 %
	7	760,51	760,02	757,18	757,18	0,06 %	0,06 %	0,44 %
	8	665,23	662,36	662,40	662,49	0,43 %	0,43 %	0,41 %
	9	694,96	694,89	694,85	694,85	0,01 %	0,01 %	0,02 %
	Media					1,76 %	1,92 %	1,83 %
RC1	1	1749,07	1693,64	1693,41	1693,4	3,17 %	3,18 %	3,18 %
	2	1438,07	1340,85	1344,87	1344,8	6,76 %	6,48 %	6,49 %
	3	1377,81	1289,44	1294,13	1294,1	6,41 %	6,07 %	6,08 %
	4	1213,34	1146,91	1136,35	1136,3	5,47 %	6,35 %	6,35 %
	5	1650,32	1608,70	1585,91	1585,9	2,52 %	3,90 %	3,90 %
	6	1671,40	1619,20	1611,74	1611,7	3,12 %	3,57 %	3,57 %
	7	1397,04	1370,81	1359,22	1359,2	1,88 %	2,71 %	2,71 %
	8	1419,07	1341,36	1312,71	1312,7	5,48 %	7,50 %	7,50 %
	Media					4,35 %	4,97 %	4,97 %
Todas	Media					4,18 %	4,62 %	4,50 %

TABLA 9.34: Comparación de eventos de reoptimización - 50 Tareas

Clase	Test	TC				Mejora		
		NoReOpt	FinT	FixT	DEP	FinT	FixT	DEP
R1	1	2437,01	2428,43	2356,57	2421,49	0,35 %	3,30 %	0,64 %
	2	2122,75	2076,49	2018,53	2070,22	2,18 %	4,91 %	2,47 %
	3	1979,76	1901,31	1891,55	1919,59	3,96 %	4,46 %	3,04 %
	4	1896,44	1765,43	1773,74	1780,16	6,91 %	6,47 %	6,13 %
	5	2331,51	2290,55	2322,15	2283,20	1,76 %	0,40 %	2,07 %
	6	2084,83	2019,31	2039,82	2040,56	3,14 %	2,16 %	2,12 %
	7	2061,32	1868,71	1866,25	1880,44	9,34 %	9,46 %	8,77 %
	8	1939,14	1753,99	1745,91	1757,56	9,55 %	9,96 %	9,36 %
	9	2267,75	2132,27	2139,43	2187,43	5,97 %	5,66 %	3,54 %
	10	2097,25	1983,53	1994,27	1960,82	5,42 %	4,91 %	6,51 %
	11	2161,00	2011,61	1998,79	1998,02	6,91 %	7,51 %	7,54 %
	12	2068,31	1984,76	1988,54	1889,68	4,04 %	3,86 %	8,64 %
	Media					4,96 %	5,25 %	5,07 %
C1	1	1802,10	1734,87	1771,73	1726,02	3,73 %	1,69 %	4,22 %
	2	1741,55	1666,39	1650,30	1692,21	4,32 %	5,24 %	2,83 %
	3	1609,97	1532,61	1544,57	1510,35	4,80 %	4,06 %	6,19 %
	4	1536,06	1473,97	1474,09	1474,45	4,04 %	4,03 %	4,01 %
	5	1733,23	1654,15	1656,91	1632,91	4,56 %	4,40 %	5,79 %
	6	1798,90	1736,44	1742,35	1731,01	3,47 %	3,14 %	3,77 %
	7	1566,08	1533,96	1530,03	1566,24	2,05 %	2,30 %	-0,01 %
	8	1475,05	1408,02	1408,06	1408,24	4,54 %	4,54 %	4,53 %
	9	1580,48	1515,95	1513,53	1510,89	4,08 %	4,24 %	4,40 %
	Media					3,96 %	3,74 %	3,97 %
RC1	1	3660,11	3583,14	3622,99	3525,84	2,10 %	1,01 %	3,67 %
	2	3039,92	2937,89	2930,06	2934,77	3,36 %	3,61 %	3,46 %
	3	2733,04	2596,98	2584,93	2570,76	4,98 %	5,42 %	5,94 %
	4	2536,33	2348,29	2339,00	2348,42	7,41 %	7,78 %	7,41 %
	5	3377,75	3309,41	3283,87	3324,32	2,02 %	2,78 %	1,58 %
	6	3458,56	3348,66	3373,48	3360,59	3,18 %	2,46 %	2,83 %
	7	2837,43	2672,23	2637,17	2687,46	5,82 %	7,06 %	5,29 %
	8	2874,25	2715,35	2667,87	2715,59	5,53 %	7,18 %	5,52 %
	Media					4,30 %	4,66 %	4,46 %
Todas	Media					4,47 %	4,62 %	4,56 %

TABLA 9.35: Comparación de eventos de reoptimización - 100 Tareas

Clase	Test	TC				Mejora		
		NoReOpt	FinT	FixT	DEP	FinT	FixT	DEP
R1	1	4458,57	4485,95	4441,56	4446,59	-0,61 %	0,38 %	0,27 %
	2	4120,78	3925,46	3912,83	3924,33	4,74 %	5,05 %	4,77 %
	3	3836,68	3418,70	3410,26	3416,38	10,89 %	11,11 %	10,95 %
	4	3280,86	3189,69	3177,82	3181,80	2,78 %	3,14 %	3,02 %
	5	4225,69	3954,79	3920,24	3923,01	6,41 %	7,23 %	7,16 %
	6	3845,58	3607,95	3559,28	3595,32	6,18 %	7,44 %	6,51 %
	7	3826,27	3302,14	3279,80	3292,70	13,70 %	14,28 %	13,95 %
	8	3483,28	3122,64	3114,42	3117,97	10,35 %	10,59 %	10,49 %
	9	4019,20	3721,85	3724,77	3722,97	7,40 %	7,33 %	7,37 %
	10	4092,08	3547,34	3492,63	3517,16	13,31 %	14,65 %	14,05 %
	11	4282,85	3758,58	3722,34	3736,58	12,24 %	13,09 %	12,75 %
	12	3862,71	3506,39	3511,72	3508,69	9,22 %	9,09 %	9,17 %
	Media					8,05 %	8,61 %	8,37 %
C1	1	4299,49	4111,08	4127,76	4125,37	4,38 %	3,99 %	4,05 %
	2	4344,32	3973,34	3998,85	3997,26	8,54 %	7,95 %	7,99 %
	3	4055,16	3494,30	3469,49	3481,28	13,83 %	14,44 %	14,15 %
	4	3717,70	3357,28	3392,37	3382,96	9,69 %	8,75 %	9,00 %
	5	4322,53	3928,00	3884,04	3925,78	9,13 %	10,14 %	9,18 %
	6	3865,25	3674,77	3695,35	3678,73	4,93 %	4,40 %	4,83 %
	7	3976,80	3792,59	3805,03	3797,63	4,63 %	4,32 %	4,51 %
	8	3590,45	3302,79	3303,01	3303,01	8,01 %	8,01 %	8,01 %
	9	3807,79	3587,54	3653,58	3607,67	5,78 %	4,05 %	5,26 %
	Media					7,66 %	7,34 %	7,44 %
RC1	1	5855,04	5694,58	5658,72	5679,47	2,74 %	3,35 %	3,00 %
	2	4943,91	4738,67	4742,00	4740,92	4,15 %	4,08 %	4,11 %
	3	4476,04	4148,08	4155,40	4152,98	7,33 %	7,16 %	7,22 %
	4	4457,77	4051,15	4060,07	4054,21	9,12 %	8,92 %	9,05 %
	5	5575,07	5464,34	5493,59	5472,62	1,99 %	1,46 %	1,84 %
	6	5583,21	5107,82	5143,27	5127,92	8,51 %	7,88 %	8,15 %
	7	4763,56	4536,01	4522,54	4534,38	4,78 %	5,06 %	4,81 %
	8	4900,52	4573,41	4503,02	4515,22	6,68 %	8,11 %	7,86 %
	Media					5,66 %	5,75 %	5,76 %
Todas	Media					7,27 %	7,43 %	7,36 %

## 9.5. Inclusión de mecanismos de mejora sobre I<sup>2</sup>PH

Las soluciones alcanzadas con los métodos heurísticos pueden ser mejoradas a través de búsquedas locales o métodos metaheurísticos, como los mostrados en el Capítulo 8. Este epígrafe trata de estudiar la influencia de tales mecanismos de mejora sobre la heurística propuesta, realizándose el estudio en entornos con y sin incertidumbre, y con y sin reoptimización. Se tomará de ejemplo los problemas con 25 tareas.

La Tabla 9.36 muestra la influencia de las búsquedas locales (LS) y del algoritmo genético (GA) en entornos estáticos, tanto en el caso de tiempo de tránsito determinista como estocástico. De hecho se puede deducir que en entornos estáticos, estos métodos siempre mejoran las soluciones; sin embargo, en entornos estocásticos esto no siempre tiene por qué ser así. Esto se debe al hecho que tales mecanismos mejoran las soluciones condensando las mismas; cuando existe incertidumbre en el tránsito a veces es preferible tener ciertas holguras que puedan asimilar los retrasos.

La Tabla 9.37 muestra los resultados alcanzados cuando estos mecanismos son aplicados en entornos dinámicos y con incertidumbre, en el caso de reoptimizaciones al finalizar las tareas. De nuevo, se puede observar que debido al carácter estocástico del experimento estos mecanismos no producen siempre mejora. Como excepción los problemas de la clase C1 sí suelen tener una tendencia de mejora; esto se debe a la forma de este tipo de problemas, donde las tareas se encuentran clusterizadas, causando que se reduzcan considerablemente el número de pares de tareas posibles y por tanto eliminándose cierta dispersión que podría aparecer ante la reoptimización..

Como también se comentó en el Capítulo 8, el algoritmo genético podría ser usado como método para adaptar las soluciones previamente a la nueva situación. Es decir, en cada reoptimización se toma la solución previa del sistema, y se añade a la población del algoritmo genético. Los resultados de dicha metodología se encuentran en la Tabla 9.38. En general la solución mejora.

En este punto habría que plantearse qué resultaría más conveniente: o bien reoptimizar haciendo uso de la heurística I<sup>2</sup>PH, o bien reoptimizar adaptando soluciones previas mediante el algoritmo genético. La elección dependerá en gran medida de los medios computacionales de los que se disponga y del tamaño del problema. Una comparativa de cómo varían los tiempos de computación se muestra en la Figuras 9.2; donde 9.2(a) señala el coste computacional de una simple iteración y 9.2(b) el coste de simular una jornada completa.

TABLA 9.36: Mecanismos de mejora sobre I<sup>2</sup>2PH en entornos estáticos - 25 Tareas

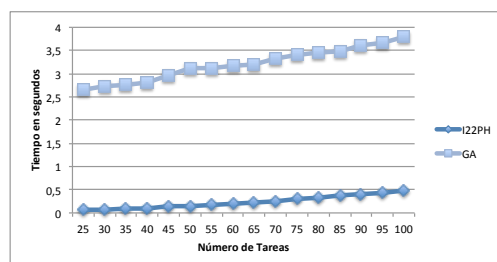
Clase	Test	TC						Mejora			
		Sin Incertidumbre			Con incertidumbre			Sin Incertidumbre		Con incertidumbre	
		I2P	I2P+LS	I2P+GA	I2P	I2P+LS	I2P+GA	I2P+LS	I2P+GA	I2P+LS	I2P+GA
R1	1	1084,40	1080,06	1084,40	1302,23	1324,88	1303,32	0,40	0,00	-1,74	-0,08
	2	1031,44	1031,44	1031,44	1089,96	1146,81	1074,32	0,00	0,00	-5,22	1,43
	3	891,66	875,46	891,66	996,72	1038,07	958,24	1,82	0,00	-4,15	3,86
	4	860,31	858,57	860,31	906,93	877,62	879,36	0,20	0,00	3,23	3,04
	5	1054,28	1054,28	1054,28	1238,57	1240,35	1187,77	0,00	0,00	-0,14	4,10
	6	1010,58	1010,58	1010,58	1142,78	1163,17	1091,72	0,00	0,00	-1,78	4,47
	7	995,33	972,97	994,87	1114,50	1101,55	1109,22	2,25	0,05	1,16	0,47
	8	958,25	946,89	958,25	1068,37	1057,11	1034,29	1,19	0,00	1,05	3,19
	9	945,21	945,21	945,21	1130,64	1136,38	1122,09	0,00	0,00	-0,51	0,76
	10	907,67	901,92	907,53	1029,45	1020,97	1040,57	0,63	0,02	0,82	-1,08
	11	962,54	962,54	962,54	1145,63	1157,87	1157,87	0,00	0,00	-1,07	-1,07
	12	951,15	932,74	951,15	995,40	975,69	971,29	1,94	0,00	1,98	2,42
	Media							0,70	0,01	-0,53	1,79
C1	1	837,13	837,13	803,75	920,35	918,09	863,48	0,00	3,99	0,25	6,18
	2	708,13	669,11	672,76	829,24	759,59	770,69	5,51	5,00	8,40	7,06
	3	673,46	672,46	673,46	673,50	672,46	673,43	0,15	0,00	0,15	0,01
	4	675,82	671,55	675,82	675,82	671,55	675,72	0,63	0,00	0,63	0,01
	5	767,16	764,00	749,80	833,50	821,14	812,58	0,41	2,26	1,48	2,51
	6	839,91	820,65	754,17	929,41	916,89	846,88	2,29	10,21	1,35	8,88
	7	758,59	758,39	758,59	760,51	758,98	756,78	0,03	0,00	0,20	0,49
	8	652,36	649,04	652,36	665,23	653,80	661,44	0,51	0,00	1,72	0,57
	9	694,89	684,64	694,89	694,96	684,64	691,34	1,48	0,00	1,49	0,52
	Media							1,22	2,38	1,74	2,92
RC1	1	1561,39	1561,39	1561,39	1749,07	1758,18	1702,05	0,00	0,00	-0,52	2,69
	2	1247,52	1247,52	1247,52	1438,07	1435,14	1420,43	0,00	0,00	0,20	1,23
	3	1222,29	1212,29	1149,75	1377,81	1393,52	1324,22	0,82	5,93	-1,14	3,89
	4	1132,62	1121,27	1132,62	1213,34	1264,35	1179,86	1,00	0,00	-4,20	2,76
	5	1455,62	1445,62	1444,06	1650,32	1689,12	1628,18	0,69	0,79	-2,35	1,34
	6	1434,75	1432,96	1434,75	1671,40	1637,72	1652,36	0,12	0,00	2,01	1,14
	7	1304,56	1302,15	1304,56	1397,04	1421,62	1386,42	0,18	0,00	-1,76	0,76
	8	1239,86	1238,90	1239,86	1419,07	1400,80	1397,00	0,08	0,00	1,29	1,55
	Media							0,36	0,84	-0,81	1,92
Todas	Media							0,77	0,97	0,10	2,18

TABLA 9.37: Mecanismos de mejora sobre I<sup>2</sup>2PH en entornos dinámicos - 25 Tareas

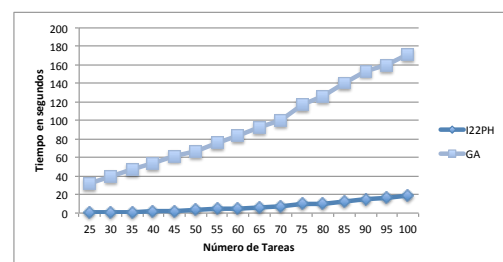
Clase	Test	TC			Mejora	
		I2P	I2P+LS	Ip2+GA	I2P+LS	Ip2+GA
R1	1	1285,33	1259,07	1290,57	2,04 %	-0,41 %
	2	1072,29	1101,91	1086,77	-2,76 %	-1,35 %
	3	911,59	941,03	902,67	-3,23 %	0,98 %
	4	862,21	860,48	860,48	0,20 %	0,20 %
	5	1171,91	1194,79	1180,20	-1,95 %	-0,71 %
	6	1093,99	1093,60	1092,50	0,04 %	0,14 %
	7	1016,09	1014,96	1004,07	0,11 %	1,18 %
	8	986,82	993,31	1016,55	-0,66 %	-3,01 %
	9	1066,65	1070,46	1113,78	-0,36 %	-4,42 %
	10	946,85	941,11	934,58	0,61 %	1,30 %
	11	1005,11	1006,81	1017,15	-0,17 %	-1,20 %
	12	974,01	955,03	1020,06	1,95 %	-4,73 %
	Media				-0,35 %	-1,00 %
C1	1	901,60	902,72	930,93	-0,12 %	-3,25 %
	2	782,27	800,93	804,86	-2,39 %	-2,89 %
	3	673,46	672,46	652,03	0,15 %	3,18 %
	4	675,82	673,32	675,82	0,37 %	0,00 %
	5	779,85	776,84	775,84	0,39 %	0,51 %
	6	918,45	829,02	873,86	9,74 %	4,86 %
	7	760,02	766,26	782,25	-0,82 %	-2,93 %
	8	662,36	650,47	661,06	1,79 %	0,20 %
	9	694,89	694,64	694,64	0,04 %	0,04 %
	Media				1,02 %	-0,03 %
RC1	1	1693,64	1688,60	1693,13	0,30 %	0,03 %
	2	1340,85	1354,43	1314,14	-1,01 %	1,99 %
	3	1289,44	1289,44	1324,85	0,00 %	-2,75 %
	4	1146,91	1148,05	1143,38	-0,10 %	0,31 %
	5	1608,70	1614,25	1629,92	-0,34 %	-1,32 %
	6	1619,20	1603,07	1581,49	1,00 %	2,33 %
	7	1370,81	1406,75	1330,91	-2,62 %	2,91 %
	8	1341,36	1320,95	1330,94	1,52 %	0,78 %
	Media				-0,16 %	0,54 %
Todas	Media				0,13 %	-0,28 %

TABLA 9.38: El GA como método de adaptación en entornos dinámicos - 25 Tareas

Clase	Test	TC	Mejora
R1	1	1206,3	6,15 %
	2	1079,08	-0,63 %
	3	897,51	1,54 %
	4	868,05	-0,68 %
	5	1180,23	-0,71 %
	6	1041,09	4,84 %
	7	994,9	2,09 %
	8	965,37	2,17 %
	9	1097,61	-2,90 %
	10	978,76	-3,37 %
	11	1030,09	-2,49 %
	12	951,08	2,35 %
	Media		0,70 %
C1	1	785,66	12,86 %
	2	755,11	3,47 %
	3	673,42	0,01 %
	4	676,09	-0,04 %
	5	740,18	5,09 %
	6	824,7	10,21 %
	7	717,66	5,57 %
	8	650,88	1,73 %
	9	683,83	1,59 %
	Media		4,50 %
RC1	1	1698,88	-0,31 %
	2	1323,34	1,31 %
	3	1266,9	1,75 %
	4	1166,58	-1,71 %
	5	1599,45	0,57 %
	6	1552,75	4,10 %
	7	1379,67	-0,65 %
	8	1354,92	-1,01 %
	Media		0,51 %
Todas	Media		1,82 %



(a) Una simple iteración de la reoptimización



(b) Simulación del día completo

FIGURA 9.2: Coste computacional de I<sup>2</sup>2PH y GA

## 9.6. Resultados de interés para la tesis

El capítulo ha presentado los resultados de aplicar la batería de problemas generada al sistema diseñado, mostrando qué configuración de las posibilidades que se han barajado produce mejores resultados.

Primero se ha mostrado qué aumento porcentual supone la incertidumbre en los costes, para después ver qué parte de ese aumento puede ser reducida gracias a la mayor información que es suministrada en nuestro sistema.

De todas las heurísticas estudiadas, I<sup>2</sup>2PH fue la que mejores prestaciones ha presentado. Como dato de interés cabe reseñar que los métodos tradicionales de mejora no tienen por qué proporcionar mejora en entornos con incertidumbre.

Además se propuso un algoritmo genético como método de adaptación de soluciones previas, que si bien obtenía buenos resultados incrementaba exponencialmente el tiempo computacional.



## Conclusiones

Desde las distintas instituciones se viene señalando la necesidad de un cambio de paradigma en el transporte, tanto de pasajeros como de mercancías, de modo que este sea más sostenible. Esto ha hecho que Europa haya centrado su política de transportes en la potenciación de un sistema intermodal; prueba de ello son los ejes definidos como prioritarios para la inclusión en la Red Transeuropea de Transporte.

Sin embargo, desde el punto de vista de los usuarios la intermodalidad presenta todavía muchas carencias, haciendo que esta se presente como un transporte no competitivo con el transporte por carretera.

Potenciar la intermodalidad significa realizar una serie de acciones por parte de organismos tanto públicos como privados, estando incluida dentro de las mismas el desarrollo de las infraestructuras de transporte necesarias. Sin embargo, teniendo en cuenta la actual situación económica de Europa, se hace previsible que estas infraestructuras tarden en llegar.

Este trabajo, después de analizar la situación actual de la intermodalidad en Europa y de proponer una serie de líneas de investigación para su mejora, se ha centrado en la optimización de uno de los eslabones de la cadena logística intermodal: el acarreo terrestre.

La gestión centralizada del acarreo terrestre, es decir, la optimización del *daily drayage problem*, presenta oportunidades interesantes en el desarrollo del transporte intermodal en Europa. Su optimización supondría una mejora en el transporte sin la necesidad de grandes inversiones. Permitiría incrementar el escaso atractivo que actualmente tiene la intermodalidad reduciendo el coste para sus usuarios.

En la literatura existente relativa a la optimización del acarreo terrestre predomina un enfoque estático del problema, donde se propone una serie de rutas que los

vehículos han de seguir durante la jornada laboral. Este planteamiento provocaría retrasos en las entregas ante cualquier imprevisto que pueda suceder durante la jornada, con el consecuente perjuicio que eso podría provocar en la cadena de transporte intermodal. Los estudios realizados sobre una batería de problemas demuestran que la incertidumbre en el tiempo de tránsito provoca alrededor de un 10-15 % de incremento en el coste de las rutas en el caso de usar este planteamiento estático.

Esta tesis ha propuesto un sistema centralizado de optimización basado en información en tiempo real de la flota de vehículos, pasando a un enfoque dinámico del problema. Esto permite que, ante cualquier imprevisto, el sistema sea capaz de corregir las desviaciones que se producen en la programación, reasignando tareas a vehículos en el caso de que fuera necesario. Dos aspectos han sido considerado determinantes a la hora de desarrollar el sistema; por un lado, determinar en qué momento se debían llevar a cabo las reoptimizaciones, y por otro lado, qué algoritmos usar para realizar las reasignaciones en tiempo.

Varias posibilidades han sido analizadas para determinar en qué momentos es interesante llevar a cabo la reoptimización. Los estudios demostraron que un incremento en el número de reoptimizaciones trae ligada una mejora en los resultados medios. Sin embargo, lo realmente interesante es realizar las reoptimizaciones cuando existe la posibilidad de cambiar la ruta sin perturbar demasiado la trayectoria de los vehículos; es decir, que el vehículo pueda modificar su ruta, pero el conductor no lo percibe, al no ser su destino inmediato modificado. Esto podría conseguirse reoptimizando al finalizar cada tarea, antes del comienzo de la siguiente.

En cuanto a los algoritmos de asignación, se propusieron varias alternativas. De ellas la más destacada fue el algoritmo I<sup>2</sup>2PH, que explotaba las propiedades de las tareas de importación y exportación en búsqueda de pares de tareas que producían ahorro al realizarlas de forma conjunta. Dicho algoritmo incorporaba una serie de mecanismos para evitar el mayor número posible de tareas incumplidas. Además existía un mecanismo de compensación de las soluciones previas, para evitar reasignaciones innecesarias. Otra de las posibilidades destacadas fue usar un algoritmo genético que adaptara a la nueva situación las soluciones previamente alcanzadas.

Es importante recalcar la importancia del tiempo de cálculo en este tipo de sistemas. Los usuarios del mismo no deberían esperar demasiado en la respuesta sobre su nuevo destino. En relación a ese aspecto la heurística I<sup>2</sup>2PH ha mostrado unos tiempos de computación adecuados.

Los estudios realizados sobre la batería de problemas demuestran que el sistema dinámico planteado podría ahorrar de media en torno a un 5-7 % de los costes. Este porcentaje sólo considera como información extra la posición de cada vehículo en cada instante; si además se dispusiera de información actualizada del tráfico, este ahorro medio debería verse aumentado.

Por tanto, el sistema planteado consigue un doble objetivo: por un lado hacer más atractivo al transporte intermodal desde el punto de vista económico, reduciendo sus coste y, por tanto, disminuyendo su distancia de ruptura; y por otro lado disminuir las posibles pérdidas del trayecto principal, mejorando por tanto el aspecto temporal del transporte intermodal.

## 10.1. Resultados alcanzados

Como consecuencia del trabajo realizado, esta tesis ha llegado a una serie de resultados que merecen ser destacados:

- Se ha realizado un estudio de la situación actual del transporte de mercancías en Europa, desarrollando los problemas que actualmente presenta (Capítulo 2)
- Se ha planteado los motivos por los que se presenta a la intermodalidad como alternativa, estudiando qué mercado presenta actualmente la misma, y qué líneas de mejora se deben plantear para el desarrollo de este esquema de transporte (Capítulos 3, 4 y ??).
- Se ha seleccionado la optimización del acarreo terrestre como línea de mejora con un gran potencial, realizándose un estudio de la bibliografía existente y formulando el problema tanto para entornos dinámicos como estáticos (Capítulo 5).
- Se ha propuesto un sistema centralizado que gestiona información en tiempo real sobre la posición de los vehículos para ofrecer mejores soluciones al acarreo terrestre (Capítulo 6).
- Se han expuestos diferentes alternativas que integrarían la inteligencia del sistema anteriormente mencionado: heurísticas y metaheurísticas (Capítulo 7 y 8).
- Se ha demostrado la utilidad del sistema (Capítulo 9) usando para ello una batería de problemas y un entorno de simulación creados para tal fin (Apéndice A); dicha batería es una adaptación del *benchmark* que Solomon propuso para los problemas VRPTW.
- Se ha presentado un método matricial para el cálculo del coste de una ruta, que es capaz de ahorrar un 40 % del tiempo de computación en sistemas adaptados al cálculo matricial (Apéndice B).

Algunos de estos resultados se encuentran publicados en revistas indexadas y en actas de congresos, tanto nacionales como internacionales. Cuatro publicaciones en revistas se han realizado; las dos primeras se encuentran indexadas dentro del JCR, las otras dos lo están en otras bases de datos científicas:

- Escudero A, Muñuzuri J, Guadix J y Arango C (2013) *Dynamic approach to solve the daily drayage problem with transit time uncertainty*. Computers in Industry, In press.
- Escudero A, Muñuzuri J, Arango C y Onieva L (2011) *A satellite navigation system to improve the management of intermodal drayage*. Advanced Engineering Informatics, **25**(3), 427-434.
- Escudero A, Muñuzuri J, Guadix J y Arango C (2011) *Heurística de asignación en tiempo real de vehículos a tarifas de acarreo intermodal*. Dirección y Organización, Revista de Ingeniería de Organización, **45**, 32-37.
- Escudero A, Raicu R, Muñuzuri J y Delgado MC (2010) *Dynamic optimization of urban intermodal freight transport with random transit times, flexible tasks and time windows*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, **2**(3), 6109-6117.

De las actas de congreso caben destacar:

- Escudero A, Muñuzuri J, Onieva L, Arango C (2012) *Oportunidades del daily drayage problem en la optimización del transporte de mercancías europeo*. 6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVI Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2012), Vigo.
- Escudero A, Muñuzuri J, Cortés P y Onieva L (2011) *A drayage problem considering real-time vehicle position knowledge by using genetic algorithm*. 3er World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC 2011), Salamanca.
- Escudero A, Muñuzuri J, Van Duin JHR, Onieva L y Guadix J (2010) *Knowledge of real time position of vehicles and Its impact on the improvement of intermodal drayage operations*. 12th World Conference on Transport Research (WCTR 2010), Lisboa.
- Escudero A, Raicu R, Muñuzuri J y Delgado MC (2009) *Dynamic optimization of urban freight intermodal transport with random transit Times, flexible tasks and time windows*. The 6th International Conference on City Logistics (CL VI) Puerto Vallarta.
- Escudero A, Muñuzuri J, Onieva L y Gutiérrez M (2009) *A genetic algorithm for real-time optimisation of drayage operations*. International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS 2009) Puerto la Cruz.
- Escudero A, Delgado MC, Muñuzuri J y Onieva L (2007) *Modelo de ayuda a la decisión en transporte intermodal*. XI Congreso de Ingeniería de Organización -

International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (CIO 2007), Madrid.

## 10.2. Líneas futuras de investigación

El trabajo de investigación no se considera concluido con la publicación de esta tesis, muchas son las líneas que se abren a partir de este momento. Estudiar otras heurísticas y metaheurísticas para la resolución del problema planteado se intuye como la línea de continuación más evidente, pero además existen otras líneas que pueden hacer de este trabajo un punto de partida para futuras investigaciones.

Entre estas líneas podría contemplarse por ejemplo: estudiar el problema considerando en la evaluación de las soluciones una función multiobjetivo; considerar no sólo tareas de importación y exportación, sino también tareas flexibles que implicarán la optimización de la logística de los contenedores vacíos; considerar información en tiempo real sobre el estado de las carreteras, y no sólo sobre la posición de los vehículos; o considerar la inclusión de tareas *online*, que van llegando a lo largo de la jornada laboral. Algunas de estas líneas son propuestas que se han ido recibiendo conforme el trabajo ha sido revisado para su publicación en diferentes revistas y congresos. Indudablemente no son las únicas, esperándose conocer nuevas propuestas conforme el trabajo se vaya difundiendo.



## Parte III

# Apéndices





# Batería de Problemas y entorno de simulación

Este apéndice presenta la batería de problemas usada para testar los diferentes algoritmos y heurísticas presentados a lo largo de esta tesis, y la descripción del entorno de simulación desarrollado para poder llevar a cabo los test en entornos estocásticos.

## A.1. Bateria de problemas

La batería está diseñada de forma que las diferentes instancias que contiene cubran los diferentes factores que afectarían el comportamiento de las diferentes heurísticas. Estos factores están caracterizados principalmente por la distribución geográfica de las tareas y la caracterización de las ventanas temporales de los mismos. Cada instancia está compuesta de 100 tareas diferentes, siendo posible el testado de instancias de menor tamaño usando sólo los necesarias necesarios. La batería está compuesta de 29 instancias

TABLA A.1: Batería de problemas

Clase	Número de Instancias	Horizonte Temporal	Localización del depósito
R1	12	460	(35,35)
C1	9	1236	(35,35)
RC1	8	480	(40,50)

(ver Tabla A.1) divididas en 3 clases: R1, C1, y RC1. Estas están basadas en las baterías presentadas por Solomon (1987) y Li y Lim (2001), pero adaptadas al problema bajo estudio; de dichas baterías se tomaron las clases con horizonte corto. Se tomó 1 como el coste por kilometro desplazado, 10 el coste de cada nuevo vehículo usado, 10 como coste

por hora tardía de recogida de un contenedor en la terminal, y 100 en el caso de que el contenedor perdiera el trayecto principal por llegada tardía a una entrega.

En la clase R1 las tareas del acarreo intermodal están distribuidos aleatoriamente (*Randomly*) en el *hinterland* de la terminal. En la clase C1 las tareas están distribuidos en diferentes grupos o *Clusters*. En la clase RC1 los usuarios están semi-clusterizados, existiendo tareas agrupadas en grupos y otras distribuidas aleatoriamente.

A modo de ejemplo se han representado en los siguientes epígrafes los tres casos de distribución de los clientes diferente: la Figura A.1.1 es una instancia de la clase R1, donde los clientes están distribuidos aleatoriamente; la Figura A.1.2 es una instancia de la clase C1, donde los clientes están distribuidos por *clusters*; y la Figura A.1.3 es una instancia de la clase RC1, donde los clientes presentan una distribución semi-clusterizada. En todos los casos el asterisco verde representa el deposito, los círculos rojos representan clientes que esperan recibir un contenedor y los triángulos azules clientes que quieren enviar un contenedor

Cada clase presenta un número determinados de instancias con características diferentes. Entre las diferentes instancias se ha tratado de diversificar características de las ventanas temporales tales como el tamaño de las mismas, es decir, el tiempo que es posible acceder a la tarea; su homogeneidad, es decir, si todos los clientes que presentas limitaciones temporales la duración de la misma es fija; y el porcentaje de usuarios afectados por tales restricciones, creándose instancias con el 25, 50, 75 y 100 % de las tareas con ventanas temporales. Las características particulares de cada instancia serán presentadas en los siguientes epígrafes.

### A.1.1. La clase R

La clase R1 está compuesta por 12 instancias; un resumen de las características de las mismas puede verse en la Tabla A.2.

TABLA A.2: Clase R

Clase	Instancias	Longitud de la ventana				Porcentaje de tareas con limitación temporal
		Media	Desviación	Máxima	Mínima	
R1	01	20	0	-	-	100 %
R1	02	20	0	-	-	75 %
R1	03	20	0	-	-	50 %
R1	04	20	0	-	-	25 %
R1	05	60	0	-	-	100 %
R1	06	60	0	-	-	75 %
R1	07	60	0	-	-	50 %
R1	08	60	0	-	-	25 %
R1	09	120	15	166	74	100 %
R1	10	170	65	330	46	100 %
R1	11	180	95	368	38	100 %
R1	12	230	25	332	146	100 %

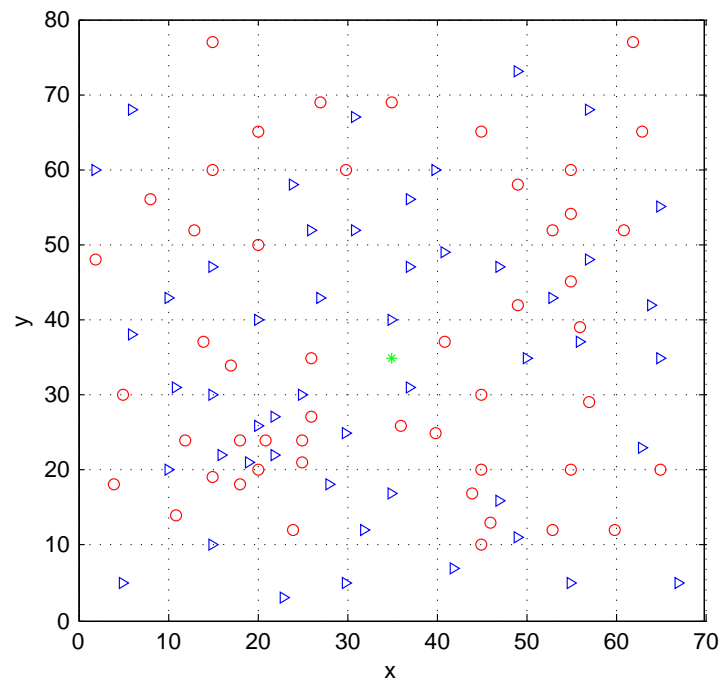


FIGURA A.1: Distribución aleatoria de los clientes (R1-01)

### A.1.2. La clase C

En la clase C1 las tareas están distribuidas en *clusters*. Esta clase tiene 9 instancias, las características de las ventanas temporales de cada una de ellas se muestra en la Tabla A.3.

TABLA A.3: Clase C

Clase	Instancias	Longitud de la ventana				Porcentaje de tareas con limitación temporal
		Media	Desviación	Máxima	Mínima	
C1	01	20	0	-	-	100 %
C1	02	20	0	-	-	75 %
C1	03	20	0	-	-	50 %
C1	04	20	0	-	-	25 %
C1	05	60	0	-	-	100 %
C1	06	60	0	-	-	75 %
C1	07	60	0	-	-	50 %
C1	08	60	0	-	-	25 %
C1	09	120	15	166	74	100 %

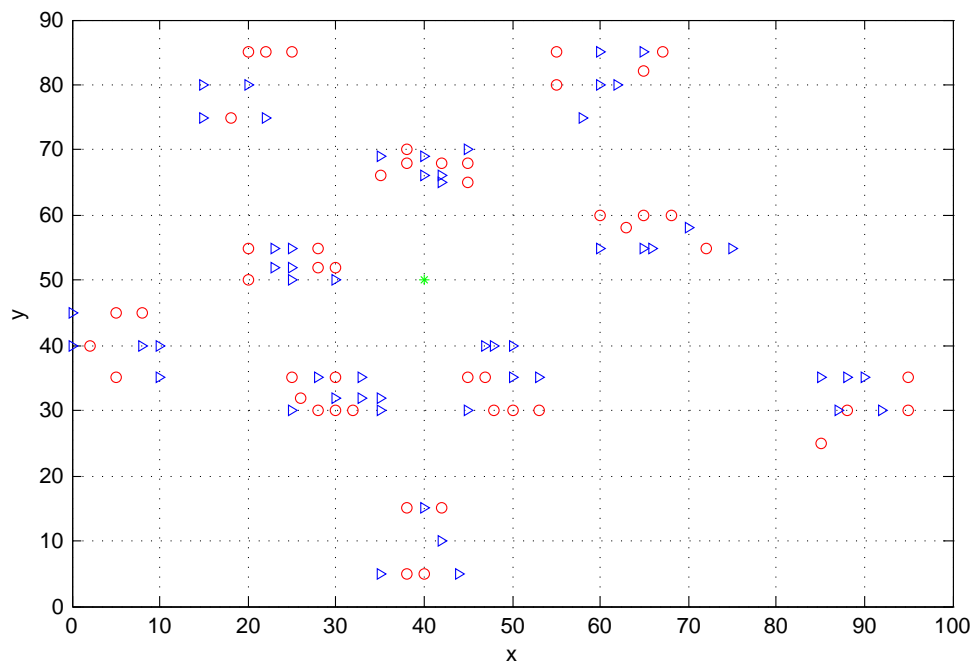


FIGURA A.2: Distribución clusterizada de los clientes (C1-01)

### A.1.3. La clase RC

La clase RC1 tiene 8 instancias semi-clusterizadas. Un resumen de las características de las ventanas temporales de cada una de las instancias se muestra en la Tabla A.4.

TABLA A.4: Clase RC

Clase	Instancias	Longitud de la ventana				Porcentaje de tareas con limitación temporal
		Media	Desviación	Máxima	Mínima	
RC1	01	20	0	-	-	100 %
RC1	02	20	0	-	-	75 %
RC1	03	20	0	-	-	50 %
RC1	04	20	0	-	-	25 %
RC1	05	60	0	-	-	100 %
RC1	06	60	0	-	-	75 %
RC1	07	60	0	-	-	50 %
RC1	08	60	0	-	-	25 %

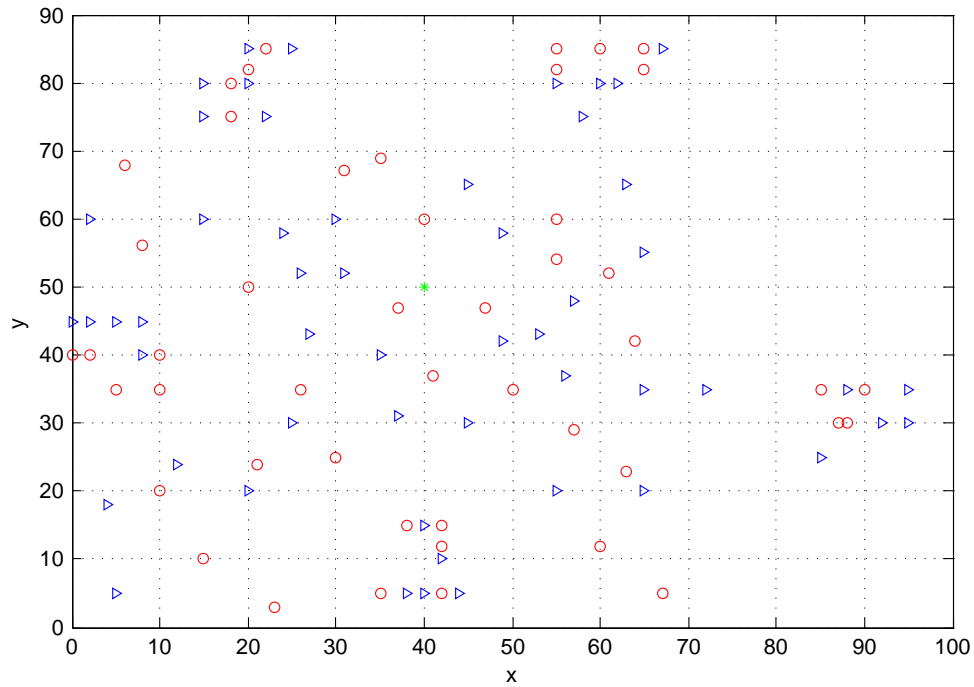


FIGURA A.3: Distribución semi-clusterizada de los clientes (RC1-01)

#### A.1.4. Ejemplo de instancia

A modo de ejemplo se muestra en la Tabla A.5 la instancia R1-01 al completo. La primera columna,  $N$ ., identifica la tarea a realizar; la segunda columna,  $Type$ , muestra si se trata de una tarea de importación (1) o de exportación (2); la tercera y cuarta columna,  $O_x$  y  $O_y$ , caracterizan las coordenadas cartesianas del origen de la tarea; de forma similar ocurre en las columnas quinta y sexta para el caso del destino de la tarea,  $D_x$  y  $D_y$ ; las octava y novena,  $E_i^O$  y  $L_i^O$ , definen los límites de la ventana temporal en el origen; las décima,  $c_1^O$ , es referente del coste de esperar en el origen; la undécima,  $c_{wait}^O$  es por contra el coste de llegar tarde al mismo; las siguientes cuatro columnas,  $E_i^D$ ,  $L_i^D$ ,  $c_{wait}^D$  y  $c_{miss}^D$ , tienen significado análogo pero en el caso del destino; las dos últimas columnas,  $s_i^O$  y  $s_i^D$ , muestran el tiempo de carga y descarga.

## A.2. Entorno de simulación

Para simular el tiempo de tránsito estocástico, el área donde se desarrollan las tareas fue dividida en cuadrados de 1x1. Cada cuadrado tiene asignada una función de distribución de la velocidad, siendo la media de dicha velocidad conocida,  $\overline{v_{xy}}$ , pero no así la velocidad en tiempo real,  $v_{xy}$ .

TABLA A.5: Ejemplo de instancia - Clase R1 Test 1

$N$	Type	$O_x$	$O_y$	$D_x$	$D_y$	$E^O$	$L^O$	$c^O$	$c^O_{wait}$	$E^P$	$L^P$	$c^P_{wait}$	$c^P_{miss}$	$s^O$	$s^P$
1	2	41	49	35	35	0	460	0	0	322	342	10	-100	15	15
2	1	35	35	35	17	100	120	0	10	0	460	0	0	15	15
3	2	55	45	35	35	0	460	0	0	232	252	10	-100	15	15
4	2	55	20	35	35	0	460	0	0	298	318	10	-100	15	15
5	1	35	35	15	30	68	88	0	10	0	460	0	0	15	15
6	2	25	30	35	35	0	460	0	0	198	218	10	-100	15	15
7	2	20	50	35	35	0	460	0	0	162	182	10	-100	15	15
8	1	35	35	10	43	190	210	0	10	0	460	0	0	15	15
9	2	55	60	35	35	0	460	0	0	194	214	10	-100	15	15
10	2	30	60	35	35	0	460	0	0	248	268	10	-100	15	15
11	1	35	35	20	65	134	154	0	10	0	460	0	0	15	15
12	2	50	35	35	35	0	460	0	0	126	146	10	-100	15	15
13	2	30	25	35	35	0	460	0	0	318	338	10	-100	15	15
14	1	35	35	15	10	64	84	0	10	0	460	0	0	15	15
15	1	35	35	30	5	122	142	0	10	0	460	0	0	15	15
16	1	35	35	10	20	150	170	0	10	0	460	0	0	15	15
17	2	5	30	35	35	0	460	0	0	314	334	10	-100	15	15
18	1	35	35	20	40	174	194	0	10	0	460	0	0	15	15
19	2	15	60	35	35	0	460	0	0	152	172	10	-100	15	15
20	2	45	65	35	35	0	460	0	0	252	272	10	-100	15	15
21	1	35	35	45	20	124	144	0	10	0	460	0	0	15	15
22	2	45	10	35	35	0	460	0	0	194	214	10	-100	15	15
23	1	35	35	55	5	136	156	0	10	0	460	0	0	15	15
24	1	35	35	65	35	306	326	0	10	0	460	0	0	15	15
25	2	65	20	35	35	0	460	0	0	344	364	10	-100	15	15
26	2	45	30	35	35	0	460	0	0	264	284	10	-100	15	15
27	1	35	35	35	40	74	94	0	10	0	460	0	0	15	15
28	1	35	35	41	37	78	98	0	10	0	460	0	0	15	15
29	1	35	35	64	42	126	146	0	10	0	460	0	0	15	15
30	1	35	35	40	60	142	162	0	10	0	460	0	0	15	15
31	1	35	35	31	52	100	120	0	10	0	460	0	0	15	15
32	2	35	69	35	35	0	460	0	0	282	302	10	-100	15	15
33	1	35	35	53	52	74	94	0	10	0	460	0	0	15	15
34	2	65	55	35	35	0	460	0	0	234	254	10	-100	15	15
35	1	35	35	63	65	286	306	0	10	0	460	0	0	15	15
36	1	35	35	2	60	82	102	0	10	0	460	0	0	15	15
37	2	20	20	35	35	0	460	0	0	268	288	10	-100	15	15
38	2	5	5	35	35	0	460	0	0	166	186	10	-100	15	15
39	1	35	35	60	12	88	108	0	10	0	460	0	0	15	15
40	1	35	35	40	25	170	190	0	10	0	460	0	0	15	15
41	2	42	7	35	35	0	460	0	0	194	214	10	-100	15	15
42	1	35	35	24	12	62	82	0	10	0	460	0	0	15	15
43	1	35	35	23	3	264	284	0	10	0	460	0	0	15	15
44	1	35	35	11	14	138	158	0	10	0	460	0	0	15	15
45	1	35	35	6	38	64	84	0	10	0	460	0	0	15	15
46	2	2	48	35	35	0	460	0	0	234	254	10	-100	15	15
47	1	35	35	8	56	102	122	0	10	0	460	0	0	15	15
48	2	13	52	35	35	0	460	0	0	330	350	10	-100	15	15
49	2	6	68	35	35	0	460	0	0	216	236	10	-100	15	15
50	2	47	47	35	35	0	460	0	0	248	268	10	-100	15	15
51	1	35	35	49	58	176	196	0	10	0	460	0	0	15	15
52	1	35	35	27	43	104	124	0	10	0	460	0	0	15	15
53	1	35	35	37	31	190	210	0	10	0	460	0	0	15	15
54	2	57	29	35	35	0	460	0	0	280	300	10	-100	15	15
55	1	35	35	63	23	272	292	0	10	0	460	0	0	15	15
56	1	35	35	53	12	260	280	0	10	0	460	0	0	15	15
57	2	32	12	35	35	0	460	0	0	202	222	10	-100	15	15
58	2	36	26	35	35	0	460	0	0	400	420	10	-100	15	15
59	1	35	35	21	24	36	56	0	10	0	460	0	0	15	15
60	2	17	34	35	35	0	460	0	0	324	344	10	-100	15	15
61	1	35	35	12	24	152	172	0	10	0	460	0	0	15	15
62	1	35	35	24	58	116	136	0	10	0	460	0	0	15	15
63	1	35	35	27	69	68	88	0	10	0	460	0	0	15	15
64	1	35	35	15	77	146	166	0	10	0	460	0	0	15	15
65	1	35	35	62	77	102	122	0	10	0	460	0	0	15	15
66	1	35	35	49	73	254	274	0	10	0	460	0	0	15	15
67	2	67	5	35	35	0	460	0	0	166	186	10	-100	15	15
68	1	35	35	56	39	284	304	0	10	0	460	0	0	15	15
69	1	35	35	37	47	100	120	0	10	0	460	0	0	15	15
70	2	37	56	35	35	0	460	0	0	364	384	10	-100	15	15
71	1	35	35	57	68	154	174	0	10	0	460	0	0	15	15
72	1	35	35	47	16	70	90	0	10	0	460	0	0	15	15
73	2	44	17	35	35	0	460	0	0	156	176	10	-100	15	15
74	1	35	35	46	13	298	318	0	10	0	460	0	0	15	15
75	1	35	35	49	11	138	158	0	10	0	460	0	0	15	15
76	1	35	35	49	42	146	166	0	10	0	460	0	0	15	15
77	2	53	43	35	35	0	460	0	0	358	378	10	-100	15	15
78	2	61	52	35	35	0	460	0	0	192	212	10	-100	15	15
79	2	57	48	35	35	0	460	0	0	184	204	10	-100	15	15
80	2	56	37	35	35	0	460	0	0	364	384	10	-100	15	15
81	2	55	54	35	35	0	460	0	0	188	208	10	-100	15	15
82	1	35	35	15	47	110	130	0	10	0	460	0	0	15	15
83	1	35	35	14	37	88	108	0	10	0	460	0	0	15	15
84	2	11	31	35	35	0	460	0	0	202	222	10	-100	15	15
85	2	16	22	35	35	0	460	0	0	182	202	10	-100	15	15
86	2	4	18	35	35	0	460	0	0	188	208	10	-100	15	15
87	2	28	18	35	35	0	460	0	0	186	206	10	-100	15	15
88	1	35	35	26	52	148	168	0	10	0	460	0	0	15	15
89	2	26	35	35	35	0	460	0	0	352	372	10	-100	15	15
90	1	35	35	31	67	190	210	0	10	0	460	0	0	15	15
91	2	15	19	35	35	0	460	0	0	320	340	10	-100	15	15
92	1	35	35	22	22	36	56	0	10	0	460	0	0	15	15
93	2	18	24	35	35	0	460	0	0	376	396	10	-100	15	15
94	2	26	27	35	35	0	460	0	0	200	220	10	-100	15	15
95	1	35	35	25	24	78	98	0	10	0	460	0	0	15	15
96	2	22	27	35	35	0	460	0	0	270	290	10	-100	15	15
97	2	25	21	35	35	0	460	0	0	266	286	10	-100	15	15
98	1	35	35	19	21	116	136	0	10	0	460	0	0	15	15
99	1	35	35	20	26	166	186	0	10	0	460	0	0	15	15
100	2	18	18	35	35	0	460	0	0	370	390	10	-100	15	15

El tiempo esperado de tránsito,  $\bar{t}$ , de un desplazamiento es la suma de los tiempos esperados de transito de cada tramo; lo mismo ocurre con los tiempos reales de tránsito,  $t$ . Siguiendo el ejemplo de la Figura A.4 el tiempo esperado de tránsito,  $\overline{t_{AB}}$ , y el tiempo real de tránsito,  $t_{AB}$ , son calculados atendiendo a la ecuaciones (A.1) y (A.2).

$$\bar{t}_i = d_i / \overline{v_{xy}} \qquad \overline{t_{AB}} = \sum_{i=1:4} \bar{t}_i \qquad (\text{A.1})$$

$$t_i = d_i / v_{xy} \qquad t_{AB} = \sum_{i=1:4} t_i \qquad (\text{A.2})$$

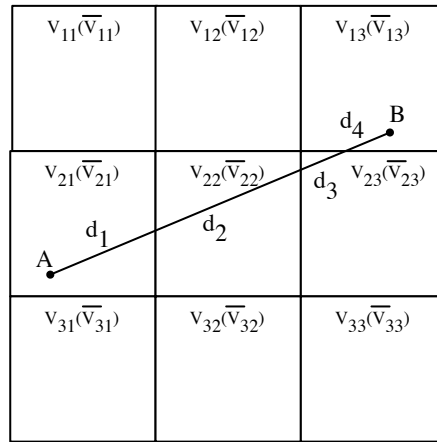


FIGURA A.4: Cálculo del tiempo de tránsito

Dado que el tiempo de transito es estocástico, 100 diferentes patrones de velocidad fueron testados para cada instancia; para de este modo poder tener una representación sobre diferentes situaciones de tráfico. A su vez, para no convertir al problema en un problema de camino más corto en entornos estocásticos se simplifico las simulaciones imponiendo que si bien la realización de la velocidad era desconocida, la media de la velocidad en todos los cuadros debía ser la misma; tomándose como función de distribución de la misma una normal media 50 y desviación 10.





## Viabilidad de una solución propuesta

El DDPTW presenta una serie de restricciones temporales, ventanas temporales, que condicionarán la viabilidad de las diferentes soluciones que puedan ser propuestas al problema. Determinar bajo que condiciones una ruta deja de ser viable es fundamental en el funcionamiento de los diferentes algoritmos propuestos.

Una cuestión especialmente interesante es determinar si la inserción de una determinada tarea a los largo de una ruta viable llevaría a la misma a una situación no factible, es decir, a retrasos que llevarán a la ruta a no cumplir todas sus restricciones temporales.

Este apéndice se centra en estudiar la viabilidad de las rutas; primero se presenta un lema enunciado por [Solomon \(1987\)](#) sobre las condiciones de viabilidad en un VRPTW y se adapta el mismo al problema bajo estudio; seguidamente se desarrolla un método de determinación de la viabilidad matricial, especialmente útil en entornos de simulación como los usados en este trabajo.

### B.1. Adaptación del lema de Solomon

[Solomon \(1987\)](#) enunció un lema sobre las condiciones suficientes y necesarias que determinan la viabilidad de una ruta del VRPTW, siendo las ventanas temporales estrictas. Dicho lema podría ser adaptado al DDPTW, según sigue:

Considerando una ruta  $r_v = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_{p-1}, i_p, \dots, i_m\}$  servida por el vehículo  $v$ , insertar una tarea extra,  $j$ , entre las tareas  $i_{p-1}$  y  $i_p$  podría provocar un retraso en la realización de las tareas  $i_p$  y posteriores. Todas las tareas de la ruta tienen una serie de restricciones temporales,  $[E_i^O, L_i^O]$  y  $[E_i^D, L_i^D]$ , que podrían verse incumplidas debido al retraso anteriormente mencionado.

**Lemma 1:** Las condiciones suficientes y necesarias que determinan la viabilidad temporal cuando se inserta una nueva tarea, dígase  $j$ , entre las tareas  $i_{p-1}$  y  $i_p$ ,  $1 \leq p \leq m$ , dentro de una ruta factible y parcialmente construida,  $\{i_1, i_2, i_3, \dots, i_{p-1}, i_p, \dots, i_m\}$ , son:

$$st_j^O \leq L_j^O \quad (B.1)$$

$$st_j^D \leq L_j^D \quad (B.2)$$

$$st_{i_r}^O + PF_{i_r}^O \leq L_{i_r}^O \quad p \leq r \leq m \quad (B.3)$$

$$st_{i_r}^D + PF_{i_r}^D \leq L_{i_r}^D \quad p \leq r \leq m \quad (B.4)$$

donde

$$PF_{i_p}^O = st_{i_p}^{O^{new}} - st_{i_p}^O \geq 0 \quad (B.5)$$

$$PF_{i_r}^D = \max(0, PF_{i_p}^O - w_{i_r}^D) \quad p \leq r \leq m \quad (B.6)$$

$$PF_{i_{r+1}}^O = \max(0, PF_{i_p}^D - w_{i_{r+1}}^O) \quad p \leq r \leq m - 1 \quad (B.7)$$

$PF_{i_r}^O$  y  $PF_{i_r}^D$  representarían el empuje sucesivo que se va haciendo sobre las rutas posteriores como consecuencia de la inserción de una nueva ruta. Este empuje vendría compensado en parte por los tiempos de espera innecesarios entre tareas,  $w_{i_r}^O$  y  $w_{i_r}^D$ , que representarían el tiempo de espera hasta poder comenzar a servir la tarea  $i_r$  bien en el origen o bien en el destino. Sin embargo si  $PF_{i_r}$  es demasiado elevado, puede llevar al incumplimiento de las restricciones temporales.

Solomon (1987) propuso correr iterativamente el lema hasta que se encontrara una tarea que fuese imposible de realizar cumpliendo las condiciones temporales, lo cual determinaría la no viabilidad de la ruta.

## B.2. Método matricial de valoración de la viabilidad

Como se ha comentado anteriormente, el cumplimiento de las restricciones temporales se ha hecho tradicionalmente iterativamente, es decir, ir secuencialmente comprobando el momento de llegada a los diferentes puntos del espacio, y comprobando si las restricciones temporales se cumplen.

El método de Solomon (1987) no es más que una forma elegante de calcular todas las nuevas  $st_{i_r}^O$  y  $st_{i_r}^D$  de la ruta, como se muestra en la ecuación (B.8), para después comprobar que se cumple con las restricciones temporales mostradas en las ecuaciones (B.9) y (B.10)

$$\begin{aligned}
 st_1^O &= time = E_1^O \\
 st_1^D &= \text{máx}(st_1^O + s_1^O + t_1, E_1^D) \\
 st_2^O &= \text{máx}(st_1^D + s_1^D + t_{12}, E_2^O) \\
 st_2^D &= \text{máx}(st_2^O + s_2^O + t_2, E_2^D) \\
 &\vdots \\
 st_m^O &= \text{máx}(st_{m-1}^D + s_{m-1}^D + t_{m-1\ m}, E_m^O) \\
 st_m^D &= \text{máx}(st_m^O + s_m^O + t_m, E_m^D)
 \end{aligned} \tag{B.8}$$

$$st_{i_r}^O \leq L_{i_r}^O \quad \forall i_r, 1 \leq i_r \leq m \tag{B.9}$$

$$st_{i_r}^D \leq L_{i_r}^D \quad \forall i_r, 1 \leq i_r \leq m \tag{B.10}$$

Este método mejora su rendimiento computacional debido a que en muchas ocasiones la inviabilidad aparecía en las primeras tareas; sin embargo, en el problema bajo estudio, al ser las restricciones temporales suavizadas en su momento más tardío, siempre habría que seguir iterando hasta el final de la ruta. Pueden darse situaciones de incumplimiento de las restricciones estrictas, pero que satisfagan el problema planteado en mejores condiciones que otras soluciones totalmente factible. Por tanto, es siempre necesario comprobar la ruta entera, y además, ponderar el coste de los posibles incumplimientos de las restricciones temporales.

Dado que el trabajo desarrollado en esta tesis se ha codificado en un entorno de programación optimizado para el cálculo matricial<sup>1</sup> y que, por los motivos presentados anteriormente, no sólo es necesario comprobar la factibilidad sino también valorarla, se consideró interesante desarrollar un método matricial para tal fin; el cual se presenta a continuación.

Siguiendo con las ecuaciones (B.8), se simplifico la notación a través de los siguientes cambios de variables:  $t'_i = s_i^O + t_i$  y  $t'_{i\ i+1} = s_i^D + t_{i\ i+1}$ . Quedando ahora las ecuaciones (B.8) como siguen:

---

<sup>1</sup>MATLAB

$$\begin{aligned}
st_1^O &= time = E_1^O \\
st_1^D &= \text{máx}(st_1^O + t'_1, E_1^D) \\
st_2^O &= \text{máx}(st_1^D + t_{12}', E_2^O) \\
st_2^D &= \text{máx}(st_2^O + t'_2, E_2^D) \\
&\vdots \\
st_m^O &= \text{máx}(st_{m-1}^D + t'_{m-1\ m}, E_m^O) \\
st_m^D &= \text{máx}(st_m^O + t'_m, E_m^D)
\end{aligned} \tag{B.11}$$

Estas ecuaciones (B.11) pueden ser representadas de forma matricial a través de una serie de pasos sencillos y que optimizan el tiempo de calculo de los mismos, evitando la iteración innecesaria. Llámese  $\vec{t}$  al vector formado por la secuencia de todas las  $t'_i$  y  $t'_{ij}$ , y llámese  $\vec{e}$  y  $\vec{e}^-$  al vector formado por todas las restricciones en llegada temprana de las diferentes tareas y su equivalente desplazado a la izquierda; es decir  $\vec{t} = \{t'_1, t'_{12}, t'_2, \dots, t'_{m-1\ m}, t'_m\}$ ,  $\vec{e} = \{E_1^O, E_1^D, E_2^O, E_2^D, \dots, E_m^O\}$  y  $\vec{e}^- = \{E_1^D, E_2^O, E_2^D, \dots, E_m^O, E_m^D\}$ . Por facilitar aún mas la notación se renombrarán los componentes del vector  $\vec{t}$  de modo que quede una lectura continua y facilmente indexada, por lo que pasará a ser  $\vec{t} = \{\dot{t}_1, \dot{t}_2, \dot{t}_3, \dot{t}_4, \dots, \dot{t}_{m'}\}$ , siendo  $m' = m \cdot 2 - 1$

Sea  $T^{m' \times m'}$  la matriz formada a partir del vector  $\vec{t}$ , siguiendo los pasos mostrados en la ecuación (B.12).  $diag(\vec{t})$  es una matriz cuadrada de  $m' \times m'$  cuya diagonal esta formada por los elementos de  $\vec{t}$  y  $U^{m' \times m'}$  es la matriz unitaria triangular superior.

$$T^{m' \times m'} = U \cdot diag(\vec{t}) \cdot U = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{t}_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \dot{t}_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \dot{t}_{m'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \tag{B.12}$$

Los elementos de  $T$  cumplen la ecuación (B.13), mostrándose la matriz generica en la ecuación (B.14),

$$\dot{t}_{ij} = \begin{cases} \sum_{x=i}^j \dot{t}_x & \text{si } j \geq i \\ 0 & \text{si } j < i \end{cases} \tag{B.13}$$

$$T^{m' \times m'} = \begin{pmatrix} t_1 & t_1 + t_2 & t_1 + t_2 + t_3 & \cdots & \sum_{i=1}^{n-1} t_i & \sum_{i=1}^n t_i & \cdots & \sum_{i=1}^{m'} t_i \\ 0 & t_2 & t_2 + t_3 & \cdots & \sum_{i=2}^{n-1} t_i & \sum_{i=2}^n t_i & \cdots & \sum_{i=2}^{m'} t_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & t_n & t_n + t_{n+1} & \cdots & \sum_{i=n}^{m'} t_i \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & t_{n+1} & \cdots & \sum_{i=n+1}^{m'} t_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & t_{m'} \end{pmatrix} \quad (\text{B.14})$$

Sea  $E^{m' \times m'}$  la matriz formada a partir del vector  $\vec{e}$ , siguiendo los pasos mostrados en la ecuación (B.15).  $\text{diag}(\vec{e})$  es una matriz cuadrada de  $m' \times m'$  cuya diagonal esta formada por los elementos de  $\vec{e}$ . La matriz formada puede contemplarse en la ecuación (B.16)

$$E^{m' \times m'} = \text{diag}(\vec{e}) \cdot U = \begin{pmatrix} E_1^O & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_1^D & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & E_m^O \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.15})$$

$$E^{m' \times m'} = \begin{pmatrix} E_1^O & E_1^O & E_1^O & E_1^O & \cdots & E_1^O \\ 0 & E_1^D & E_1^D & E_1^D & \cdots & E_1^D \\ 0 & 0 & E_2^O & E_2^O & \cdots & E_2^O \\ 0 & 0 & 0 & E_2^D & \cdots & E_2^D \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & E_m^O \end{pmatrix} \quad (\text{B.16})$$

Sea la matriz  $A^{m' \times m'}$  la suma de las matrices  $T$  y  $E$ , es decir,  $A = T + E$ , luego  $a_{ij} = t_{ij} + e_{ij}$ . La cual contendrá los posibles tiempos de llegada a un determinado lugar de la ruta dependiendo de si han tenido que esperar o no en las lugares anteriores de la misma para cumplir con las restricciones temporales. De dicha matriz puede deducirse la matriz  $AT^{1 \times m'}$  que busca maximizar cada una de las columnas de la matriz  $A$ , es decir,  $AT^{1 \times m'}$  es tal que para una columna  $n$  de  $A$ ,  $at_{1n} = \max(a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}, \dots, a_{nm'})$ . Esta matriz contiene información sobre los tiempos de llegada a los diferentes puntos de interés de la ruta; es decir:

$$AT^{1 \times m'} = \begin{pmatrix} at_1^D & at_2^O & at_2^D & \cdots & at_{m'}^O & at_{m'}^D \end{pmatrix} \quad (\text{B.17})$$

Se puede entonces definir una matriz  $ST^{1 \times m'}$  cuyos elementos buscan el máximo entre los elementos de  $AT^{1 \times m'}$  y de  $E^{-1 \times m'}$ , mostrada en la ecuación (B.18). Los elementos cumplirán por tanto la siguiente ecuación  $st_{1j} = \max(at_{1j}, e_{1j}^-)$  y por tanto

la matriz contendrá la información relativa al los instantes  $st_{i_r}^O$  y  $st_{i_r}^D$  de las diferentes tareas de la ruta, como puede verse en la ecuación (B.19).

$$E_{1 \times m'}^- = \begin{pmatrix} E_1^D & E_2^O & E_2^D & \cdots & E_m^O & E_m^D \end{pmatrix} \quad (\text{B.18})$$

$$\begin{aligned} ST_{1 \times m'} &= \begin{pmatrix} \max(at_{11}, e_{11}^-) & \max(at_{12}, e_{12}^-) & \cdots & \max(at_{1m'}, e_{1m'}^-) \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} st_1^D & st_2^O & st_2^D & \cdots & st_{m'}^O & st_{m'}^D \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (\text{B.19})$$

Definiendo un nuevo vector  $\vec{l} = \{L_1^D, L_2^O, L_2^D, \dots, L_m^O, L_m^D\}$  que contenga información sobre las restricciones de llegada más tardías, se podrá formar una matriz  $L_{1 \times m'} = \vec{l}$  que comparada con la matriz  $ST_{1 \times m'}$  determinará el cumplimiento de las restricciones (B.9) y (B.10) por parte de todas las tareas de la solución propuesta.

$$L_{1 \times m'} = \begin{pmatrix} L_1^D & L_2^O & L_2^D & \cdots & L_m^O & L_m^D \end{pmatrix} \quad (\text{B.20})$$

### B.3. Ejemplo

Supóngase el ejemplo de la Figura B.1, donde un vehículo  $v$  situado en  $A$  en el instante  $time = 36$  se le propone realizar las tareas  $\{i_1, i_2, i_3\}$ , lo que podría traducirse asumiendo la nomenclatura extendida en todo la tesis que la ruta a realizar sería  $r_v = \{f_v^{ini}, i_1, i_2, i_3, f_v^{end}\}$ ; la Tabla B.1 muestra los datos de las diferentes tareas.

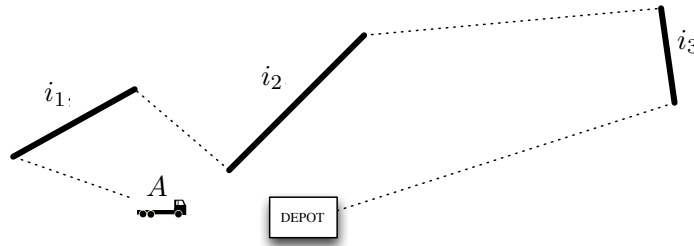


FIGURA B.1: Ejemplo del calculo matricial de la viabilidad

TABLA B.1: Datos de las tareas del ejemplo

Tarea	$E_i^O$	$L_i^O$	$s_i^O$	$t_i$	$E_i^D$	$L_i^D$	$s_i^O$	$t_{i+1}$
$f_v^{ini}$	36	36	0	0	36	36	0	25
$i_1$	60	90	15	30	110	120	15	25
$i_2$	130	145	15	45	200	230	15	60
$i_3$	270	290	15	20	275	310	15	75
$f_v^{end}$	0	480	0	0	0	480	0	-

$$\begin{aligned}
st_{f_v^{ini}}^O &= E_{f_v^{ini}}^O = time = 36 \\
st_{f_v^{ini}}^D &= \max(st_{f_v^{ini}}^O + s_{f_v^{ini}}^O + t_{f_v^{ini}}, E_{f_v^{ini}}^D) = 36 \\
st_{i_1}^O &= \max(st_{f_v^{ini}}^D + s_{f_v^{ini}}^D + t_{f_v^{ini} \ i_1}, E_{i_1}^O) = 61 \\
st_{i_1}^D &= \max(st_{i_1}^O + s_{i_1}^O + t_{i_1}, E_{i_1}^D) = 110 \\
st_{i_2}^O &= \max(st_{i_1}^D + s_{i_1}^D + t_{i_1 \ i_2}, E_{i_2}^O) = 150 \\
st_{i_2}^D &= \max(st_{i_2}^O + s_{i_2}^O + t_{i_2}, E_{i_2}^D) = 210 \\
st_{i_3}^O &= \max(st_{i_2}^D + s_{i_2}^D + t_{i_2 \ i_3}, E_{i_3}^O) = 285 \\
st_{i_3}^D &= \max(st_{i_3}^O + s_{i_3}^O + t_{i_3}, E_{i_3}^D) = 320 \\
st_{f_v^{end}}^O &= \max(st_{i_3}^D + s_{i_3}^D + t_{i_3 \ f_v^{end}}, E_{f_v^{end}}^O) = 410 \\
st_{f_v^{end}}^D &= \max(st_{f_v^{end}}^O + s_{f_v^{end}}^O + t_{f_v^{end}}, E_{f_v^{end}}^D) = 410
\end{aligned} \tag{B.21}$$

1. Definir los vectores necesarios:  $\vec{t}$ ,  $\vec{e}$ ,  $\vec{e}^-$  y  $\vec{l}$

$$\begin{aligned}
\vec{t} &= \{0, 25, 45, 40, 60, 75, 35, 90, 0\} \\
\vec{e} &= \{36, 36, 60, 110, 130, 200, 270, 275, 0\} \\
\vec{e} &= \{36, 60, 110, 130, 200, 270, 275, 0, 0\} \\
\vec{l} &= \{36, 90, 120, 145, 230, 290, 310, 480, 480\}
\end{aligned}
\tag{B.22}$$

2. Calcular las matrices  $T$ ,  $E$ , y  $A$

[illegible]

[illegible]

$$A^{m' \times m'} = T + E = \begin{pmatrix} 36 & 61 & 106 & 146 & 206 & 281 & 316 & 406 & 406 \\ 0 & 61 & 106 & 146 & 206 & 281 & 316 & 406 & 406 \\ 0 & 0 & 105 & 145 & 205 & 280 & 315 & 405 & 405 \\ 0 & 0 & 0 & 150 & 210 & 285 & 320 & 410 & 410 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 190 & 265 & 300 & 390 & 390 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 275 & 310 & 400 & 400 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 305 & 395 & 395 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 365 & 365 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{B.25})$$

3. Calcular las matrices  $AT$  y  $ST$

$$AT_{1 \times m'} = \begin{pmatrix} 36 & 61 & 106 & 150 & 210 & 285 & 320 & 410 & 410 \end{pmatrix} \quad (\text{B.26})$$

$$ST_{1 \times m'} = \begin{pmatrix} 36 & 61 & 110 & 150 & 210 & 285 & 320 & 410 & 410 \end{pmatrix} \quad (\text{B.27})$$

4. Comparan la matriz  $ST$  con la matriz  $L$  para extraer conclusiones sobre la viabilidad de la ruta.

$$A_{m' \times m'} = T + E = \begin{pmatrix} 36 & 90 & 120 & 145 & 230 & 290 & 310 & 480 & 480 \end{pmatrix} \quad (\text{B.28})$$

Del ejemplo se pueden deducir varias conclusiones:

- El vehículo llega antes al destino de la tarea  $i_1$  por lo que debe esperar.
- El vehículo llega con retraso al origen de la tarea  $i_2$ , por lo que será penalizado.
- El vehículo llega tarde al destino de la tarea  $i_3$ , por lo que será penalizado.

Comparando el tiempo de calculo de cada uno de los métodos, el método iterativo supone un tiempo de procesamiento para la ruta de  $4,2 \cdot 10^{-5}$  segundos frente a los  $2,6 \cdot 10^{-5}$  del método matricial, lo que supone una mejora del 38,09% del tiempo de computación



## Nomenclatura

Este epígrafe muestra un resumen de la nomenclatura usada en la segunda parte de esta tesis doctoral.

$\mathcal{T}$	Conjunto de tareas
$\mathcal{T}_r$	Conjunto de tareas reales
$\mathcal{T}^I$	Conjunto de tareas de importación
$\mathcal{T}^E$	Conjunto de tareas de exportación
$\mathcal{T}_r^{WD}$	Conjunto de tareas reales bien definidas
$\mathcal{T}_r^F$	Conjunto de tareas reales flexibles
$\Upsilon_i$	Conjunto de posibles realizaciones de la tarea flexible $i$
$\mathcal{T}_f$	Conjunto de tareas ficticias
$\mathcal{T}_f^{ini}$	Conjunto de tareas ficticias de inicio
$\mathcal{T}_f^{end}$	Conjunto de tareas ficticias de finalización
$\mathcal{V}$	Conjunto de vehículos
$i$	Tarea perteneciente al conjunto $\mathcal{T}_r$
$j$	Tarea perteneciente al conjunto $\mathcal{T}_r$
$v$	Vehículo perteneciente al conjunto $\mathcal{V}$
$f_v$	Tarea ficticia perteneciente al conjunto $\mathcal{T}_f$ y relacionada con el vehículo $v$
$O_i$	Origen de la tarea $i$
$D_i$	Destino de la tarea $i$
$d_i$	Distancia entre origen y destino de la tarea $i$
$\bar{t}_i$	Tiempo de tránsito esperado entre origen y destino de la tarea $i$
$t_i$	Tiempo de tránsito entre origen y destino de la tarea $i$
$s_i^O$	Tiempo de servicio en el origen de la tarea $i$
$s_i^D$	Tiempo de servicio en el destino de la tarea $i$
$d_{ij}$	Distancia entre el destino de la tarea $i$ y el origen de la tarea $j$
$\bar{t}_{ij}$	Tiempo de tránsito esperado entre el destino de la tarea $i$ y el origen de la tarea $j$
$t_{ij}$	Tiempo de tránsito entre el destino de la tarea $i$ y el origen de la tarea $j$
$E_i^O$	Tiempo más temprano de inicio de la tarea $i$ en el origen
$L_i^O$	Momento más tardía, sin penalización, de finalización de la tarea $i$ en el origen
$E_i^D$	Tiempo más temprano de inicio de la tarea $i$ en el destino
$L_i^D$	Momento más tardía, sin penalización, de finalización de la tarea $i$ en el destino

$c_v$	Coste fijo por el uso del vehículo $v$
$c_{km}$	Coste por unidad de distancia recorrida en vacío
$c_{miss}$	Coste fijo de penalización por perdida del trayecto principal
$c_{wait}$	Coste por unidad de tiempo debido a situaciones de espera en la terminal
$c_{depot}$	Coste por unidad de tiempo debido a retrasos en el retorno al depósito
$x_{ij}$	Variable binaria de consecución entre tareas
$nv_v$	Variable binaria que identifica si el vehículo $v$ es usado por primera vez
$l_i^O$	Variable binaria que identifica retrasos en el origen de la tarea $i$
$l_i^D$	Variable binaria que identifica retrasos en el destino de la tarea $i$
$l_v^{depot}$	Variable binaria que identifica retrasos la llegada al depósito del vehículo $v$
$st_i^O$	Momento que comienza a servirse la tarea $i$ en el origen
$st_i^D$	Momento que comienza a servirse la tarea $i$ en el destino
$at_i^O$	Momento que llegada del vehículo que está sirviendo la tarea $i$ al origen
$at_i^D$	Momento que llegada del vehículo que está sirviendo la tarea $i$ al destino
$M$	Número de elevado valor
$uv_v$	Parametro que define si un vehículo fue usado previamente
<b>T</b>	Conjunto de variables estocásticas de tiempo
<b>X</b>	Conjunto de variables binarias $x_{ij}$
<b>ST</b>	Conjunto de variables binarias $st_i^O$ y $st_i^D$
$p_i^O(t)$	Probabilidad de llegada al origen de la tarea $i$ en el instante $t$
$p_i^D(t)$	Probabilidad de llegada al destino de la tarea $i$ en el instante $t$
$\overline{C_i^D}$	Coste esperado por retrasos en la llegada al destino de la tarea $i$
$\overline{C_i^O}$	Coste esperado por retrasos en la llegada al origen de la tarea $i$
$c_i^O(t)$	Coste de llegada al origen de la tarea $i$ en el instante $t$
$c_i^D(t)$	Probabilidad de llegada al destino de la tarea $i$ en el instante $t$

## Parte IV

# Bibliografía



# Bibliografía

- ABACOUKIN, C. y BALLIS, A. (2004). «Development of an expert system for the evaluation of conventional and innovative technologies in the intermodal transport area». *European Journal of Operational Research*, **152(2)**, pp. 410–419.
- ADBDEL-ATY, M.A.; KITAMURA, R. y JOVANIS, P.P. (1997). «Using stated preference data for studying the effect of advanced traffic information on drivers' route choice». *Transportation Research C*, **5(1)**, pp. 39–50.
- ALLEN, W. B. (1977). «Demand for Freight Transportation - Micro Approach». *Transportation Research*, **11(1)**, pp. 9–14.
- ALLEN, W. B.; MAHMOUD, M. M. y MCNEIL, D. (1985). «The Importance of Time in Transit and Reliability of Transit-Time for Shippers, Receivers, and Carriers». *Transportation Research Part B-Methodological*, **19(5)**, pp. 447–456.
- ARNOLD, P.; PEETERS, D. y THOMAS, I. (2004). «Modelling a rail/road intermodal transportation system». *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, **40(3)**, pp. 255–270.
- BALLIS, A. y GOLIAS, J. (2004). «Towards the improvement of a combined transport chain performance». *European Journal of Operational Research*, **152(2)**, pp. 420–436.
- BANZHAF, W. (1990). «The molecular traveling salesman». *Biological Cybernetics*, **64(1)**, pp. 7–14.
- BEIER, F.J. y FRICK, S.W. (1978). «The limits of piggyback: light at the end of the tunnel». *Transportation Journal*, **18(2)**, pp. 12–18.
- BENT, R. y HENTENRYCK, P. V. (2006). «A two-stage hybrid algorithm for pickup and delivery vehicle routing problems with time windows». *Computers and Operations Research*, **33(4)**, pp. 875–893.

- BEUTHE, M.; JOURQUIN, B.; GEERTS, J. F. y HA, C. K. A. N. (2001). «Freight transportation demand elasticities: a geographic multimodal transportation network analysis». *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, **37**(4), pp. 253–266.
- BHAT, C. R. y SARDESAI, R. (2006). «The impact of stop-making and travel time reliability on commute mode choice». *Transportation Research Part B-Methodological*, **40**(9), pp. 709–730.
- BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A. y BALL, M. (1983). «Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art». *Computers and Operations Research*, **10**(2), pp. 63–211.
- BODIN, L.; MINGOZZI, A.; BALDACCI, R. y BALL, M. (2000). «The rollon-rolloff vehicle routing problem». *Transportation Science*, **34**(3), p. 271.
- BONTEKONING, Y. M. (2006). *Hub exchange operations in intermodal hub-and-spoke networks*. Tesis doctoral, TU Delft.
- BONTEKONING, Y. M. y PRIEMUS, H. (2004). «Breakthrough innovations in intermodal freight transport». *Transportation Planning and Technology*, **27**(5), pp. 335–345.
- BONTEKONING, Y.M.; MACHARIS, C. y TRIP, J.J. (2004). «Is a new applied transportation research field emerging? A review of intermodal rail-truck freight transport literature». *Transportation Research Part A*, **38**(1), pp. 1–34.
- BRADY, RM (1985). «Optimization strategies gleaned from biological evolution». *Nature*, **317**(6040), pp. 804–806.
- BRAEKERS, K.; CARIS, A. y JANSSENS, G.K. (2012). «Integrated planning of loaded and empty container movements». *Or Spectrum*, pp. 1–22.
- BRASY, O. y GENDREAU, M. (2005). «Vehicle routing problem with time windows, part II: Metaheuristics». *Transportation Science*, **39**(1), pp. 119–139.
- CALVO, R. W. (2000). «A new heuristic for the traveling salesman problem with time windows». *Transportation Science*, **34**(1), p. 113.
- CARIS, A. y JANSSENS, G. K. (2009). «A local search heuristic for the pre-and end-haulage of intermodal container terminals». *Computers and Operations Research*, **36**(10), pp. 2763–2772.
- CARIS, A. y JANSSENS, G.K. (2010). «A deterministic annealing algorithm for the pre-and end-haulage of intermodal container terminals». *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, **2**(4), pp. 340–355.
- CARIS, A.; MACHARIS, C. y JANSSENS, G. K. (2008). «Planning problems in intermodal freight transport: Accomplishments and prospects». *Transportation Planning and Technology*, **31**(3), pp. 277–302.

- CHEUNG, R. K. y HANG, D. D. (2003). «A time-window sliding procedure for driver-task assignment with random service times». *IIE Transactions*, **35**(5), pp. 433–444.
- CHEUNG, R. K.; SHI, N.; POWELL, W. B. y SIMAO, H. P. (2008). «An attribute-decision model for cross-border drayage problem». *Transportation Research Part E*, **44**(2), pp. 217–234.
- CHOONG, S. T.; COLE, M. H. y KUTANOGLU, E. (2002). «Empty container management for intermodal transportation networks». *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, **38**(6), pp. 423–438.
- CHORUS, C. G.; ARENTZE, T. A.; MOLIN, E. J. E.; TIMMERMANS, H. J. P. y VAN WEE, B. (2006). «The value of travel information: Decision strategy-specific conceptualizations and numerical examples». *Transportation Research Part B-Methodological*, **40**(6), pp. 504–519.
- CLARKE, G. y WRIGHT, JW (1964). «Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points». *Operations Research*, **12**(4), pp. 568–581.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (1993). *White paper: Growth, competitiveness, employment - The challenges and ways forward into the 21st century*. Commission of the European Communities.
- (2001). *White paper: European transport policy for 2010 - time to decide*. Commission of the European Communities.
- (2006a). *Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Keep Europe moving - Sustainable mobility for our continent Mid-term review of the European Commission's 2001 Transport White Paper*. Commission of the European Communities.
- (2006b). *Green Paper: Towards a future Maritime Policy for the Union - A European vision for the oceans and seas*. Commission of the European Communities, Brussels.
- (2009). *Green Paper. TEN-T: A policy review - Towards a better integrated trans-European transport network at the service of the common transport policy*. Commission of the European Communities, Brussels.
- (2011). *White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system*. Commission of the European Communities, Brussels.
- CURRIE, R. H. y SALHI, S. (2003). «Exact and heuristic methods for a full-load, multi-terminal, vehicle scheduling problem with backhauling and time windows». *Journal of the Operational Research Society*, pp. 390–400.

- (2004). «A tabu search heuristic for a full-load, multi-terminal, vehicle scheduling problem with backhauling and time windows». *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, **3**(3), pp. 225–243.
- DANIELIS, R.; MARCUCCI, E. y ROTARIS, L. (2005). «Logistics managers' stated preferences for freight service attributes». *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, **41**(3), pp. 201–215.
- DAVIS, L. (1985). «Applying adaptive algorithms to epistatic domains». En: *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 162–164.
- DE JONG, GC; VAN DE VYVRE, Y. y INWOOD, H. (1995). «The value of time for freight transport». En: *World Conference on Transport Research*, Sydney.
- DE MEULEMEESTER, L.; LAPORTE, G.; LOUVEAUX, F. V. y SEMET, F. (1997). «Optimal sequencing of skip collections and deliveries». *The Journal of the Operational Research Society*, **48**(1), pp. 57–64.
- DESROCHERS, M.; DESROSIERS, J. y SOLOMON, M. M. (1992). «A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows». *Operations Research*, **40**(2), pp. 342–354.
- DESROSIERS, J.; DUMAS, Y.; SOLOMON, M. M.; SOUMIS, F.; BALL, M.; MAGNATI, T. L.; MONMA, C. L. y NEMHAUSER, G. L. (1995). «Time constrained routing and scheduling». En: *Network routing, Handbook in Operation Research and management Science*, volumen 8, pp. 35–130. INFORMS Elsevier Science.
- DUMAS, Y.; DESROSIERS, J.; GELINAS, E. y SOLOMON, M. M. (1995). «An optimal algorithm for the traveling salesman problem with time windows». *Operations Research*, pp. 367–371.
- DUMAS, Y.; DESROSIERS, J. y SOUMIS, F. (1991). «The pickup and delivery problem with time windows». *European Journal of Operational Research*, **54**(1), pp. 7–22.
- DÜRR, E. y GIANNOPOULOS, GA (2003). «SITS: a system for uniform intermodal freight transport information exchange». *International Journal of Transport Management*, **1**(3), pp. 175–186.
- ERERA, A. L.; MORALES, J. C. y SAVELSBERGH, M. (2005). «Global intermodal tank container management for the chemical industry». *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, **41**(6), pp. 551–566.
- ERERA, A. L. y SMILOWITZ, K. R. (2008). «Intermodal Drayage Routing and Scheduling». En: P. Ioannou (Ed.), *Intelligent Freight Transportation*, pp. 171–188. CRC Press. Taylor & Francis Group.



- ESCUDERO, A.; DELGADO, M.C.; MUÑUZURI, J. y ONIEVA, L. (2007). «Modelo de ayuda a la decisión en transporte intermodal». En: *International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management - XI CIO*, pp. 1859–1868. Adingor, Madrid.
- ESCUDERO, A.; MUNUZURI, J.; ARANGO, C. y ONIEVA, L. (2011). «A satellite navigation system to improve the management of intermodal drayage». *Advanced Engineering Informatics*, **25**(3), pp. 427–434.
- ESCUDERO, A.; MUNUZURI, J.; GUADIX, J. y ARANGO, C. (2013). «Dynamic approach to solve the daily drayage problem with transit time uncertainty». *Computers in Industry*. doi: 10.1016/j.compind.2012.11.006.
- EUROPEAN COMMISSION (1997). *Intermodality of goods transportation. Communication 243*. Brussels, Brussels.
- (2000). *Buenas prácticas en el transporte de mercancías*. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, Bruselas.
- (2006). «LIBRO VERDE: aplicaciones de la navegación por satélite».
- (2009). *Panorama of Transport*. European Commission, Luxembourg.
- (2010a). *EU energy and transport in figures 2010*. European Commission, Luxembourg.
- (2010b). *TEN-T Policy Review: Commission consultation document and background papers*. Directorate General for Mobility and Transport, European Commission.
- (2010c). *TEN-T Policy Review: Report of the Expert Groups*. Directorate General for Mobility and Transport, European Commission.
- (2011). *Energy, Transport and Environment Indicators, Edition 2010*. European Commission, Luxembourg.
- (2012). <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>.
- EUROPEAN CONFERENCE OF MINISTERS OF TRANSPORT (1993). «Terminology on combined transport». En: *European Conference of Ministers of Transport*, .
- (1998). «Efficient transport for Europe, policies for internalization of external costs». En: *European Conference of Ministers of Transport*, Paris.
- EVERS, P. T.; HARPER, D. V. y NEEDHAM, P. M. (1996). «The determinants of shipper perceptions of modes». *Transportation Journal*, **36**(2), pp. 13–25.

- FANCELLO, G.; PANI, C.; PISANO, M.; SERRA, P.; ZUDDAS, P. y FADDA, P. (2011). «Prediction of arrival times and human resources allocation for container terminal». *Maritime Economics & Logistics*, **13(2)**, pp. 142–173.
- FOCACCI, F.; LODI, A. y MILANO, M. (2002). «A hybrid exact algorithm for the TSPTW». *INFORMS Journal on Computing*, **14(4)**, pp. 403–417.
- FOGEL, D. B. (1988). «An Evolutionary Approach to the Traveling Salesman Problem». *Biological Cybernetics*, **60(2)**, pp. 139–144.
- FOWKES, A. S.; NASH, C. A. y TWEDDLE, G. (1991). «Investigating the market for inter-modal freight technologies». *Transportation Research Part A - Policy and Practice*, **25(4)**, pp. 161–172.
- FOWKES, AS; NASH, CA y TWEDDLE, G. (1989). «Valuing the attributes of freight transport quality: Results of the Stated Preference Survey. ITS Working Paper 276.» *Informe técnico*, Institute of Transport Studies, University of Leeds.
- FOWKES, A.S. y SHINGHAL, N. (2001). «The Leeds Adaptive Stated Preference Methodology, Working Paper 558». *Informe técnico*, Institute for Transport Studies, University of Leeds..
- FRANCIS, P.; ZHANG, G. y SMILOWITZ, K. R. (2007). «Improved modeling and solution methods for the multi-resource routing problem». *European Journal of Operational Research*, **180(3)**, pp. 1045–1059.
- GENDREAU, M.; HERTZ, A.; LAPORTE, G. y STAN, M. (1998). «A generalized insertion heuristic for the traveling salesman problem with time windows». *Operations Research*, **46(3)**, pp. 330–335.
- GIANNOPOULOS, G. A. (2004). «The application of information and communication technologies in transport». *European Journal of Operational Research*, **152(2)**, pp. 302–320.
- GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley.
- GOLDBERG, D.E. y LINGLE JR, R. (1985). «Alleles, Loci and the Traveling Salesman Problem». En: *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 154–159. L. Erlbaum Associates Inc..
- GOLDBERG, D.E. y RICHARDSON, J. (1987). «Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization». En: *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic algorithms and their application*, pp. 41–49. L. Erlbaum Associates Inc..

- GRONALT, M.; HARTL, R. F. y REIMANN, M. (2003). «New savings based algorithms for time constrained pickup and delivery of full truckloads». *European Journal of Operational Research*, **151**(3), pp. 520–535.
- GROOTHEDDE, B.; RUIJGROK, C. y TAVASSZY, L. (2005). «Towards collaborative, intermodal hub networks - A case study in the fast moving consumer goods market». *Transportation Research Part E - Logistics and Transportation Review*, **41**(6), pp. 567–583.
- HARPER, D. V. y EVERS, P. T. (1993). «Competitive Issues in Intermodal Railroad-Truck Service». *Transportation Journal*, **32**(3), pp. 31–45.
- HERRERA, J. C.; WORK, D. B.; HERRING, R.; BAN, X. G.; JACOBSON, Q. y BAYEN, A. M. (2010). «Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: The Mobile Century field experiment». *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, **18**(4), pp. 568–583.
- HERTENSTEIN, J.H. y KAPLAN, R.S. (1991). *Burlington Northern: The ARES Decision (A)*. Harvard Business School.
- HOLLAND, J.H (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Michigan.
- HORN, K. (1981). «Pricing of rail intermodal service: a case study of institutional myopia». *Transportation Journal*, **21**(1), pp. 63–78.
- ILERI, Y.; BAZARAA, M.; GIFFORD, T.; NEMHAUSER, G. L.; SOKOL, J. y WIKUM, E. (2006). «An optimization approach for planning daily drayage operations». *Central European Journal of Operations Research*, **14**(2), pp. 141–156.
- IMAI, A.; NISHIMURA, E. y CURRENT, J. (2007). «A Lagrangian relaxation-based heuristic for the vehicle routing with full container load». *European Journal of Operational Research*, **176**(1), pp. 87–105.
- IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. y LIU, M. J. (2006). «The economic viability of container mega-ships». *Transportation Research Part E - Logistics and Transportation Review*, **42**(1), pp. 21–41.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (2012). «<http://www.ine.es>».
- JANIC, M. (2007). «Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network». *Transportation Research Part D - Transport and Environment*, **12**(1), pp. 33–44.
- (2008). «An assessment of the performance of the European long intermodal freight trains (LIFTS)». *Transportation Research Part a-Policy and Practice*, **42**(10), pp. 1326–1339.

- JONES, W.B.; CASSADY, C.R. y BOWDEN JR, R.O. (2000). «Developing a standard definition of intermodal transportation». *Transportation Law Journal*, **27**, p. 345.
- JULA, H.; CHASSIAKOS, A. y IOANNOU, P. (2006). «Port dynamic empty container reuse». *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, **42(1)**, pp. 43–60.
- JULA, H.; DESSOUKY, M. M.; IOANNOU, P. y CHASSIAKOS, A. (2005). «Container movement by trucks in metropolitan networks: modeling and optimization». *Transportation Research Part E*, **41(3)**, pp. 235–259.
- KIESMULLER, G. P.; DE KOK, A. G. y FRANSOO, J. C. (2005). «Transportation mode selection with positive manufacturing lead time». *Transportation Research Part E - Logistics and Transportation Review*, **41(6)**, pp. 511–530.
- KONINGS, R. y LUDEMA, M. (2000). «The competitiveness of the river-sea transport system: market perspectives on the United Kingdom-Germany corridor». *Journal of Transport Geography*, **8(3)**, pp. 221–228.
- KOUTSOPOULOS, H.N. y XU, H. (1993). «An information discounting routing strategy for advanced traveler information systems». *Transportation Research C*, **1(3)**, pp. 249–264.
- KOZAN, E. (2006). «Optimum capacity for intermodal container terminals». *Transportation Planning and Technology*, **29(6)**, pp. 471–482.
- KREUTZBERGER, E.; MACHARIS, C.; VEREECKEN, L. y WOXENIUS, J. (2003). «Is intermodal freight transport more environmentally friendly than all-road freight transport? A review». En: *7th NECTAR Conference 13 - 15 June, Umeå, Sweden*.
- LANDRIEU, A.; MATI, Y. y BINDER, Z. (2001). «A tabu search heuristic for the single vehicle pickup and delivery problem with time windows». *Journal of Intelligent Manufacturing*, **12(5)**, pp. 497–508.
- LARRAÑAGA, P.; KUIJPERS, C.; MURGA, R.; INZA, I. y DIZDAREVICH, S. (1999). «Evolutionary algorithms for the travelling salesman problem: A review of representations and operators». *Artificial Intelligence Review*, **13(2)**, pp. 129–170.
- LEVINSON, D. (2003). «The value of advanced traveler information systems for route choice». *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, **11(1)**, pp. 75–87.
- LI, H. y LIM, A. (2001). «A metaheuristic for the pickup and delivery problem with time windows». En: *Proceedings of the 13th International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, pp. 160–167. IEEE.
- LI, L. y TAYUR, S. (2005). «Medium-term pricing and operations planning in intermodal transportation». *Transportation Science*, **39(1)**, pp. 73–86.

- LIAO, CHUN HSIUNG; TSENG, PO HSING y LU, CHIN SHAN (2009). «Comparing carbon dioxide emissions of trucking and intermodal container transport in Taiwan». *Transportation Research Part D*, **14**(7), pp. 493–496.
- LU, Q. y DESSOUKY, M. M. (2006). «A new insertion-based construction heuristic for solving the pickup and delivery problem with time windows». *European Journal of Operational Research*, **175**(2), pp. 672–687.
- MACHARIS, C. y BONTEKONING, Y.M. (2004). «Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review». *European Journal of Operational Research*, **153**(2), pp. 400–416.
- MAIBACH, M.; SCHREYER, C.; SUTTER, D.; VAN ESSEN, H.P.; BOON, B.H.; SMOKERS, R.; SCHROTEN, A.; DOLL, C.; PAWLOWSKA, B. y BAK, M. (2008). «Handbook on estimation of external cost in the transport sector». *Informe técnico*, CE Delft.
- MAK, K.L. y GUO, Z.G. (2004). «A genetic algorithm for vehicle routing problems with stochastic demand and soft time windows». En: *Systems and Information Engineering Design Symposium*, pp. 183–190. IEEE.
- MATAIX, C.; PONCE, E.; GONZÁLEZ, J.A. y CARRASCO, J. (2006). «Metodología para la evaluación de alternativas para la mejora de terminales ferroviarias fronterizas de transporte de mercancías». En: ADINGOR (Ed.), *X Congreso de Ingeniería de Organización*, ADINGOR.
- MCCALLA, R.J. (1999). «Global change, local pain: intermodal seaport terminals and their service areas». *Journal of Transport Geography*, **7**, pp. 247–252.
- MCGINNIS, M. A. (1990). «The Relative Importance of Cost and Service in Freight Transportation Choice - before and after Deregulation». *Transportation Journal*, **30**(1), pp. 12–19.
- MEIXELL, M. J. y GARGEYA, V. B. (2005). «Global supply chain design: A literature review and critique». *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, **41**(6), pp. 531–550.
- MICHALEWICZ, Z. (1992). *Genetic algorithms+ data structures*. Springer.
- MIN, H. (1991). «International Intermodal Choices Via Chance-Constrained Goal Programming». *Transportation Research Part a-Policy and Practice*, **25**(6), pp. 351–362.
- MINISTERIO DE FOMENTO (2010). *Anuario Estadístico 2010*. Ministerio de Fomento.
- MINTSIS, G.; BASBAS, S.; PAPAIOANNOU, P.; TAXILTARIS, C. y TZIAVOS, I. N. (2004). «Applications of GPS technology in the land transportation system». *European Journal of Operational Research*, **152**(2), pp. 399–409.

- MORASH, E.A.; HILLE, S.J. y BRUNING, E.R. (1977). «Marketing rail piggyback services». *Transportation Journal*, **17(2)**, pp. 40–50.
- MORLOK, E. K. y SPASOVIC, L. N. (1994). «Redesigning rail-truck intermodal drayage operations for enhanced service and cost performance». *Journal of Transportation Research Forum*, **34**, pp. 16–31.
- MORLOK, E.K. y SPASOVIC, L.N. (1995). «Approaches to improving drayage in rail-truck intermodal service». En: *IEEE TransTech Conference, 30 Jul - 2 Aug*, pp. 74–80. IEEE, Seattle, WA , USA.
- MÁHR, T.; SROUR, J.; DE WEERDT, M. y ZUIDWIJK, R. (2010). «Can agents measure up? a comparative study of an agent-based and on-line optimization approach for a drayage problem with uncertainty». Traducido por notranslator, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **18(1)**, pp. 99–119.
- NAMBOOTHIRI, R. y ERERA, A. L. (2008). «Planning local container drayage operations given a port access appointment system». Traducido por notranslator, *Transportation Research Part E*, **44(2)**, pp. 185–202.
- NANRY, W. P. y BARNES, J.W. (2000). «Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search». *Transportation Research Part B*, **34(2)**, pp. 107–121.
- NIERAT, P. (1997). «Market area of rail-truck terminals: Pertinence of the spatial theory». *Transportation Research Part A - Policy and Practice*, **31(2)**, pp. 109–127.
- NOROJONO, O. y YOUNG, W. (2003). «A stated preference freight mode choice model». *Transportation Planning and Technology*, **26(2)**, pp. 195–212.
- NOZICK, L. K. y MORLOK, E. K. (1997). «Model for medium-term operations planning in an intermodal rail-truck service». *Transportation Research Part A-Policy and Practice*, **31(2)**, pp. 91–107.
- OLIVER, I.M.; SMITH, D.J. y HOLLAND, J.R.C. (1987). «A study of permutation crossover operators on the TSP». En: J. J. Grefenstette (Ed.), *Genetic Algorithms and Their Applications: Proceedings of the Second International Conference*, pp. 224–230. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, New Jersey.
- PANAYIDES, P. M. (2002). «Economic organization of intermodal transport». *Transport Reviews*, **22(4)**, pp. 401–414.
- PILLAC, V.; GENDREAU, M.; GUÉRET, C. y MEDAGLIA, A.L. (2012). «A review of dynamic vehicle routing problems». *European Journal of Operational Research*. doi: 10.1016/j.ejor.2012.08.015.
- PONCE, E. y PRIDA, B. (2006). *La logística de aprovisionamientos para la integración de la cadena de suministros*. Prentice Hall.

- PSARAFTIS, H.N. (1995). «Dynamic vehicle routing: Status and prospects». *Annals of Operations Research*, **61**(1), pp. 143–164.
- QURESHI, A. G.; TANIGUCHI, E. y YAMADA, T. (2012). «An Analysis of Exact VRPTW Solutions on ITS Data-based Logistics Instances». *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, **10**(1), pp. 34–46.
- RICCI, A. y BLACK, I. (2005). «The social costs of intermodal freight transport». *Research in Transportation Economics*, **14**, pp. 245–285.
- RODRÍGUEZ, A. (2007). «Integración de un SIG con modelos de cálculo y optimización de rutas de vehículos CVRP y software de gestión de flotas». *Dirección y Organización*, **35**, pp. 7–14.
- ROTTER, H. (2004). «New operating concepts for intermodal transport: The mega hub in Hanover/Lehrte in Germany». *Transportation Planning and Technology*, **27**(5), pp. 347–365.
- SADOUN, B y AL-BAYARI, O (2007). «Location based services using geographical information systems». *Computer Communications*, **30**, p. 3154?3160.
- SAVELSBERGH, M. W. P. y SOL, M. (1995). «The general pickup and delivery problem». *Transportation Science*, **29**(1), pp. 17–29.
- SCHREYER, C.; SCHNEIDER, C.; MAIBACK, M.; ROTHENGATTER, W.; DOLL, C. y SCHMEDDING, D. (2004). «Costes externos del transporte. Estudio de actualización». *Informe técnico*, INFRAS/IWW.
- SHINGHAL, N. y FOWKES, A.S. (2002). «Freight mode choice and adaptive stated preferences». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **38**(5), pp. 367–378.
- SHINTANI, K.; IMAI, A.; NISHIMURA, E. y PAPADIMITRIOU, S. (2007). «The container shipping network design problem with empty container repositioning». *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, **43**(1), pp. 39–59.
- SMILOWITZ, K. R. (2006). «Multi-resource routing with flexible tasks: an application in drayage operations». *IIE Transactions*, **38**(7), pp. 577–590.
- SOLOMON, M.M. (1987). «Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints». *Operations Research*, **35**(2), pp. 254–265.
- SOUTHWORTH, F. y PETERSON, B. E. (2000). «Intermodal and international freight network modeling». *Transportation Research Part C-Emerging Technologies*, **8**(1-6), pp. 147–166.
- SPASOVIC, LN y MORLOK, EK (1993). «Using marginal costs to evaluate drayage rates in rail-truck intermodal service». *Transportation Research Record*, **1383**.

- STAHLBOCK, R. y VOß, S. (2008). «Operations research at container terminals: a literature update». *Or Spectrum*, **30(1)**, pp. 1–52.
- STEENKEN, D.; VOß, S. y STAHLBOCK, R. (2004). «Container terminal operation and operations research - a classification and literature review». *Or Spectrum*, **26(1)**, pp. 3–49.
- SYSWERDA, G. (1991). «Schedule optimization using genetic algorithms». En: L. David (Ed.), *Handbook of Genetic Algorithms*, pp. 332–349. Van Nostrand Reinhold, New York.
- TARANTILIS, C. D.; DIAKOULAKI, D. y KIRANOUDIS, C. T. (2004). «Combination of geographical information system and efficient routing algorithms for real life distribution operations». *European Journal of Operational Research*, **152(2)**, pp. 437–453.
- TAYLOR, G. D.; BROADSTREET, F.; MEINERT, T. S. y USHER, J. S. (2002). «An analysis of intermodal ramp selection methods». *Transportation Research Part E*, **38(2)**, pp. 117–134.
- TRIP, J.J. y BONTEKONING, Y. (2002). «Integration of small freight flows in the intermodal transport system». *Journal of transport geography*, **10(3)**, pp. 221–229.
- TSAI, J.F.; MORLOK, E.K. y SMITH, T.E. (1994). «Optimal pricing of rail intermodal freight: models and tests». *Informe técnico*, Department of Systems Engineering, School of Engineering and Applied Science, University of Pennsylvania..
- TSAMBOULAS, D. A. y KAPROS, S. (2000). «Decision-making process in intermodal transportation». *Transportation Research Record*, **1707**, pp. 86–93.
- VAN DUIN, R. y VAN HAM, H. (1998). «Three-stage modeling approach for the design and organization of intermodal transportation services». En: *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Part 4, October 11-14*, volumen 4, pp. 4051–4056. IEEE, San Diego, CA.
- VAN KLINK, H.A. y VAN DEN BERG, G.C. (1998). «Gateways and intermodalism». *Journal of transport geography*, **6(1)**, pp. 1–9.
- VAN SCHIJNDEL, W.J. y DINWOODIE, J. (2000). «Congestion and multimodal transport: a survey of cargo transport operators in the Netherlands». *Transport Policy*, **7(4)**, pp. 231–241.
- WAHLE, J.; ANNEN, O.; SCHUSTER, C.; NEUBERT, L. y SCHRECKENBERG, M. (2001). «A dynamic route guidance system based on real traffic data». *European Journal of Operational Research*, **131(2)**, pp. 302–308.
- WANG, J.; TONG, X. y LI, Z. (2007). «An improved evolutionary algorithm for dynamic vehicle routing problem with time windows». En: *7th International Conference of*



- Computational Science ? ICCS 2007, Beijing, China, May 27 - 30*, pp. 1147–1154. Springer.
- WANG, X. y REGAN, A. C. (2002). «Local truckload pickup and delivery with hard time window constraints». *Transportation Research Part B*, **36**(2), pp. 97–112.
- WIGAN, M.; ROCKLIFFE, N.; THORESEN, T. y TSOLAKIS, D. (2000). «Valuing long-haul and metropolitan freight travel time and reliability». *Journal of Transportation and Statistics*, **3**(3), pp. 83–89.
- WINSTON, C. (1983). «The Demand for Freight Transportation - Models and Applications». *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **17**(6), pp. 419–427.
- YAN, S. Y.; BERNSTEIN, D. y SHEFFI, Y. (1995). «Intermodal Pricing Using Network Flow Techniques». *Transportation Research Part B - Methodological*, **29**(3), pp. 171–180.
- ZHANG, A. M.; LANG, C. M.; HUI, Y. V. y LEUNG, L. (2007). «Intermodal alliance and rivalry of transport chains: The air cargo market». *Transportation Research Part E - Logistics and Transportation Review*, **43**(3), pp. 234–246.
- ZHANG, G. M.; SMILOWITZ, K. y ERERA, A. (2011a). «Dynamic planning for urban drayage operations». *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, **47**(5), pp. 764–777.
- ZHANG, R. Y.; YUN, W. y KOPFER, H. (2010). «Heuristic-based truck scheduling for inland container transportation». *Or Spectrum*, **32**(3), pp. 787–808.
- ZHANG, R. Y.; YUN, W. Y. y MOON, I. (2009). «A reactive tabu search algorithm for the multi-depot container truck transportation problem». *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, **45**(6), pp. 904–914.
- ZHANG, R. Y.; YUN, W. Y. y MOON, I. K. (2011b). «Modeling and optimization of a container drayage problem with resource constraints». *International Journal of Production Economics*, **133**(1), pp. 351–359.
- ZHAO, W. J. y GOODCHILD, A. V. (2011). «Truck travel time reliability and prediction in a port drayage network». *Maritime Economics & Logistics*, **13**(4), pp. 387–418.